

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

30-0033/001
30-0033

Entwicklung von Prüftechnologien für die
Ermittlung des Festigkeits-, Verformungs-
und Temperaturdehnverhaltens von Betonstahl,
Spannstahl und Beton im Bereich tiefer Tempe-
raturen von 0°C bis -180°C

von

K. Landwehrs

J. Neisecke

F.S. Rostásy

Braunschweig, 1981

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

Die vorliegende Forschungsarbeit wurde mit Hilfe von Forschungs-
mitteln des Landes Niedersachsen (Erlaß Nr. 44/77 vom 27.02.1978
des MWK) gefördert.

V o r w o r t

Für die derzeitige und vor allem für die zukünftige Energieversorgung spielen Erdgase eine bedeutsame Rolle. Die Ursache dafür liegt sowohl in ihrem hohen Energieinhalt als auch in der fehlenden Umweltbelastung. Weder das unverbrannte noch das verbrannte Gas tragen im Gegensatz zu anderen wichtigen Energieträgern zur Umweltbelastung bei. Für eine Speicherung wirtschaftlich interessanter Gasmengen ist es jedoch erforderlich, das Erdgas zu verflüssigen, was unter Atmosphärendruck erst bei etwa -165°C möglich ist. Materialien für Speichertanks müssen daher auch bei diesen extrem tiefen Temperaturen alle für die Konstruktion und Sicherheit erforderlichen mechanisch-technologischen Festigkeits- und Verformungskennwerte besitzen.

Die bestehenden meßtechnischen Probleme beim Nachweis der Tieftemperatureignung speziell von Spannstählen und Beton waren für die Autoren Veranlassung, das hier vorgelegte Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Prüftechnologien im Tieftemperaturbereich dem niedersächsischen Minister für Wissenschaft und Kunst zur Förderung vorzuschlagen.

Nach Abschluß aller Arbeiten danken die Autoren mit Vorlage dieses Schlußberichtes gleichzeitig der fördernden Institution für die Bereitstellung der erforderlichen Forschungsmittel aus den Beiträgen des Zahlenlottos.

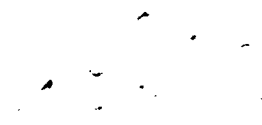
Braunschweig, im Dezember 1981



(F.S. Rostásy)



(J. Neisecke)



(K. Landwehrs)

I n h a l t

1. Allgemeines
2. Probleme der Tieftemperaturwerkstoffprüfung
 - 2.1. Erzeugung, Messung und Regelung tiefer Temperaturen
 - 2.2. Lastaufbringung bei tiefen Temperaturen
 - 2.3. Verformungsmessung bei tiefen Temperaturen
3. Praktische Ausführung der Prüfeinrichtungen
 - 3.1 Untersuchung lastabhängiger Verformungen an Stahl bei tiefen Temperaturen
 - 3.1.1. Erzeugung und Regelung der Versuchstemperatur
 - 3.1.2. Lastaufbringung
 - 3.1.3. Ermittlung der lastabhängigen Dehnung
 - 3.2. Untersuchung lastabhängiger Verformungen an Beton bei tiefen Temperaturen
 - 3.2.1. Erzeugung und Regelung der Versuchstemperatur
 - 3.2.2. Lastaufbringung
 - 3.2.3. Ermittlung der lastabhängigen Dehnung
 - 3.3. Untersuchung temperaturabhängiger Verformungen an Stahl und Beton
 - 3.3.1. Realisierung des Temperaturverlaufs
 - 3.3.2. Ermittlung der temperaturabhängigen Dehnung
4. Zusammenfassung
5. Literatur

1. Allgemeines

Die zunehmende Ausnutzung von natürlichem Erdgas als alternativem Energieträger zum knapper werdenden Erdöl wirkt zwangsläufig die Frage nach geeigneten Speichermöglichkeiten auf. Um den Transport und die Lagerung des Gases wirtschaftlich gestalten zu können, bietet sich eine Überführung in den flüssigen Aggregatzustand an, da sich hierbei das Volumen ungefähr um den Faktor 600 verringert. Allerdings ist die Verflüssigung von natürlichem Erdgas, das zu etwa 90 % aus Methan besteht, nur durch extremes Abkühlen zu erreichen, da sein Siedepunkt unter Atmosphärendruck bei ca. -162°C liegt.

Diese Temperatur und die dadurch u.U. stark veränderten mechanischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe stellen einen wesentlichen Gesichtspunkt bei der Konstruktion von Speichergefäßen für flüssiges Erdgas (LNG) dar. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lassen sowohl wirtschaftliche als auch sicherheitstechnische Überlegungen Spannbetontanks in zweischaliger Bauweise mit dazwischenliegender Wärmeisolierung als geeignetste Ausführung erscheinen.

Die Temperaturbeanspruchung der beiden Schalen ist durchaus unterschiedlich; während die innere Schale beim Befüllen die Temperatur des LNG annimmt, bleibt die äußere im normalen Betriebsfall wegen der Isolierung etwa auf Umgebungstemperatur. Im Falle einer Leckage des Innentanks kann es jedoch zu einer schockartigen lokalen Abkühlung der äußeren Schale kommen, der diese zumindest insoweit widerstehen muß, daß ein Austreten des flüssigen oder gasförmigen Inhalts wegen der damit verbundenen Explosionsgefahr verhindert wird. Der Innentank muß dagegen auf Langzeitstabilität unter zyklischen Temperaturbelastungen infolge von Füll- und Entleerungsvorgängen ausgelegt sein, die im Extremfall bei völliger Entleerung einen Temperaturwechsel um ca. 180°C bewirken können.

Zwar kann die grundsätzliche Eignung von Spannbeton zur Verwendung im Temperaturbereich um -160°C als gegeben betrachtet werden, zur vollständigen Erfassung der Temperaturabhängigkeiten aller relevanten Werkstoffeigenschaften ist jedoch noch eine Vielzahl von Untersuchungen notwendig. Diese umfassen u.a. Messungen der Druck- und der Spaltzugfestigkeit von Beton, wobei als wesentliche Parameter der Gehalt an Feuchtigkeit und ihre Verteilung im inneren Gefüge auftreten, sowie Messungen der Festigkeiten und Verformungen von Bau- und insbesondere Spannstahl verschiedener, evtl. speziell auf Tieftemperatur-einsatz hin entwickelter Sorten, die zusammen erst Aussagen über die Belastbarkeit des Bauwerks bei LNG-Temperatur ermöglichen. Neben diesen Werten interessieren hier auch die thermischen Dehnungskoeffizienten, die, falls sie für Stahl und Beton beim Abkühlen nennenswert differieren, innere Spannungen und damit Schwächung des Verbundes sowie bei Spannbeton unzulässige Änderungen der Vorspannung verursachen können. Auch in diesem Zusammenhang spielt der Wassergehalt des Betons eine entscheidende Rolle. Weitere Untersuchungen dienen der Erfassung von Relaxationserscheinungen, wie sie in Zusammenhang mit der bereits erwähnten zyklischen Temperaturbeanspruchung durch Gefügeveränderungen des Betons infolge Eisbildung ausgelöst werden können, sowie von Versprödungseffekten, welche unter Umständen die Belastbarkeit des Stahles beeinträchtigen.

Die Entwicklung und Erprobung allgemein anwendbarer Untersuchungsmethoden und der dazu erforderlichen Apparaturen für die genannten Materialeigenschaften im Temperaturbereich $+20$ bis -180°C war Ziel eines Forschungsvorhabens, das am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt wurde. Hierbei konnte teilweise auf den Erfahrungen mehrjähriger Entwicklungsarbeiten und Materialprüfungen im Bereich der Tieftemperaturuntersuchung von Baustoffen aufgebaut werden ([1] - [6]). Bei der Bearbeitung des hier vorgestellten Forschungsvorhabens wurde in besonderem Maße angestrebt, die entwickelten Prüftechnologien so

zu gestalten, daß diese in jedem mit der Materialprüfung von Baustoffen befaßten Labor mit gleichen Ergebnissen nachvollzogen werden können. Dies wurde erreicht durch die weitestgehende Verwendung von handelsüblichen, vielfach auch in der "normalen" Baustoffprüfung benutzten Geräten sowie durch einfache Konstruktionsmerkmale bei neu entwickelten Apparaturen, die einen problemlosen Nachbau ermöglichen.

2. Probleme der Tieftemperaturwerkstoffprüfung

Aus den spezifischen Eigenschaften der im Bauwesen verwendeten Materialien ergeben sich automatisch bestimmte Kriterien für die Entwicklung von Prüftechnologien für den Tieftemperaturbereich. Diese können teilweise von den bei Raumtemperatur üblichen Prüfmethoden übernommen werden, da sie vor allem die Geometrie der zu untersuchenden Proben betreffen.

Bei stark inhomogenen und in ihrer Zusammensetzung nicht exakt definierten Materialien wie Beton liefern Proben mit Abmessungen im mm- oder cm-Bereich, wie sie in der Werkstoffprüfung oft üblich sind, keine repräsentativen Ergebnisse; diese werden erst bei Probendimensionen erzielt, die ein Mehrfaches der Abmessungen der größten Einzelkomponenten - d.h. hier des Zuschlagkorns - betragen. Die Prüfeinrichtungen selbst müssen entsprechend groß und vor allem stabil ausgeführt sein, da auch die für mechanische Belastungsprüfungen aufzubringenden Kräfte mit der Probengröße anwachsen.

Selbst bei einem relativ homogenen Werkstoff wie Stahl wird die Notwendigkeit großer Probendimensionen sofort deutlich, wenn dieser in Form von Spannlitzen vorliegt. Hier muß die Prüflänge ein Mehrfaches der Schlaglänge betragen, damit ein genügend großer Prüfbereich entsteht, in dem sich die Einzeldrähte unter Belastung den Betriebsbedingungen vergleichbar aneinander anpassen können, was in den Einspannungen gar nicht und in deren unmittelbarer Nähe nur eingeschränkt möglich ist.

Für die Prüfung von Spanndrähten und Baustählen würden in der Regel kürzere Abschnitte ausreichen, doch wird man auch hier, um dieselben Apparaturen benutzen zu können, die durch die Litzen vorgegebene Probenlänge beibehalten. Ein durchaus erwünschter Nebeneffekt ist dabei die zwangsläufige Mittelung über fertigungstechnisch bedingte Inhomogenitäten, wie sie insbesondere bei Stählen mit profilierter Oberfläche vorhanden sind. Daran wird deutlich, daß es sich bei der Untersuchung von Baustählen nicht um reine Werkstoffprüfung handelt, die von Geometrie und Ausführungsform der Probe unabhängige Ergebnisse liefern soll, sondern vielmehr um die Prüfung von im Bauwesen eingesetzten Fertigungsprodukten.

Neben der Forderung, daß für Normal- und Tieftemperaturuntersuchungen an Baustoffen ähnliche Probengrößen zu verwenden sind, lassen wirtschaftliche Überlegungen und insbesondere der Wunsch nach einer Vergleichbarkeit der Meßergebnisse die Verwendung der gleichen Prüfmaschinen und Meßapparaturen bei Raum- und Tieftemperatur wünschenswert erscheinen. Grenzen für den Einsatz normaler Prüfeinrichtungen im Tieftemperaturbereich ergeben sich dort, wo durch die Kälteeinwirkung deren Funktionsfähigkeit beeinträchtigt wird, Beschädigung oder gar Zerstörung befürchtet werden muß oder wo wegen zu hoher Wärmekapazität eine Abkühlung mit vertretbarem Aufwand nicht mehr erreicht werden kann. Manche Apparaturen können durch geringfügig Modifikationen für die Tieftemperaturprüfung tauglich gemacht werden. Ob eine Erweiterung des Arbeitstemperaturbereiches mit oder ohne derartigen Abänderungen möglich ist oder ob dem Verwendungszweck angepaßte Neuentwicklungen notwendig sind, muß in jedem Einzelfall untersucht werden.

Im Folgenden sollen für die verschiedenen, bei der Tieftemperaturprüfung von Baustoffen auftretenden Problembereiche Lösungsmöglichkeiten aufgeführt und mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen diskutiert werden.

2.1. Erzeugung, Messung und Regelung tiefer Temperaturen

Als naheliegendste Methode zur Abkühlung von Probenmaterial unter die Umgebungstemperatur bietet sich die Verwendung von kühlschrankähnlichen, mit einem Kompressoraggregat betriebenen Tiefkühltruhen an. Diese werden in einer Vielzahl von Ausführungen und Größen industriell hergestellt und i.A. betriebsfertig, also mit allen erforderlichen Schalt- und Regelaggregaten geliefert. Sie benötigen nur eine normale Netzstromversorgung und gestatten eine stufenlose Einstellung der gewünschten Temperatur, wobei sich auch zeitabhängige Temperaturprogramme problemlos realisieren lassen.

Ihr wesentlichster Nachteil besteht darin, daß sie nur etwa den halben hier geforderten Temperaturbereich überstreichen können, da die Erzeugung von Temperaturen unterhalb von -100°C nach diesem Funktionsprinzip nur noch durch einen unangemessen hohen Aufwand zu bewerkstelligen wäre. Außerdem sind solche Tiefkühltruhen relativ schwer und voluminös, was die notwendige Integrierung in vorhandene Universalprüfmaschinen nahezu unmöglich macht.

Eine andere Möglichkeit der Kälteerzeugung ist die Verwendung verflüssigter Gase, die sich als Kältemittel in der industriellen und wissenschaftlichen Tieftemperaturtechnik bewährt haben. Das gilt in besonderem Maße für flüssigen Stickstoff (LN_2), der in großtechnischem Maßstab erzeugt und vertrieben wird. Neben diesen wirtschaftlichen Vorzügen ist seine - im Vergleich zu anderen Flüssiggasen - unproblematische Handhabung für den Anwender ein wesentlicher Vorteil. Da Stickstoffgas unbrennbar, ungiftig und in der Luft ohnehin zu über 70 % enthalten ist, kann LN_2 ohne besondere Vorsichts- oder Abschirmungsmaßnahmen verdampft und in die Atmosphäre abgelassen werden, wobei die freiwerdende spezifische Wärme eine hohe Kälteleistung erbringt. Die Siedetemperatur von LN_2 liegt mit -196°C noch mehr als 30 K tiefer als die des LNG, so daß die für die LNG-Beständigkeit interessierenden Materialkennwerte sogar mit beträchtlichen Sicherheitsreserven ermittelt werden können.

Die einfachste und zugleich schnellste Methode, einen Probekörper mittels LN_2 abzukühlen, besteht darin, ihn in die Flüssigkeit einzutauchen. Dabei treten im Probenmaterial, bedingt durch die endliche Wärmeleitfähigkeit, beträchtliche Temperaturgradienten auf, bevor der gesamte Körper die Temperatur des LN_2 angenommen hat. Diese Gradienten sind wegen der damit verbundenen inneren mechanischen Spannungen in der Probe, die eine zusätzliche Belastung darstellen, im Normalfall unerwünscht, es sei denn, man will gezielt das Materialverhalten bei Temperaturschockbeanspruchung untersuchen.

Anderenfalls ist eine geringere, möglichst definierte Abkühlgeschwindigkeit vorzuziehen, wie sie sich beispielsweise in einem Kryostaten realisieren läßt. Hier befindet sich die Probe in einem geschlossenen, evakuierten Gefäß, dessen Wände von außen mit LN_2 gekühlt werden. Durch Einleitung von trockenem Heliumgas kann, in Abhängigkeit von dessen Druck, eine variable thermische Kopplung zwischen Probe und LN_2 -gekühlten Wänden hergestellt werden, die zusammen mit einer elektrischen Gegenheizung die Einstellung beliebiger Temperaturen von -196°C an aufwärts gestattet.

Wegen des hohen Wärmewiderstandes zwischen Probe und Kältereservoir ist diese Methode nur bei kleinen Probendimensionen, also geringer Wärmekapazität praktikabel, wenn die Abkühlzeiten in zumutbaren Grenzen bleiben sollen. Außerdem wäre die Krafteinleitung für Druck- und Zugprüfungen sehr kompliziert, da die Durchführungen zum Innenraum wegen der Heliumfüllung vakuumdicht gestaltet sein müßten.

Handelsübliche LN_2 -betriebene Kältekammern mit kontinuierlicher Temperatureinstellung arbeiten daher nach dem Prinzip der geregelten Einspritzung definierter Mengen von LN_2 , das im Innenraum um die Probe herum fein vernebelt wird und dabei verdampft. Die dazu benötigte Wärmemenge wird dem Probekörper entzogen und bewirkt so eine zügige, aber fein dosierbare Abkühlung, da über ein von einem elektrischen Temperaturregler gesteuertes Magnetventil immer nur die jeweils zur Aufrecht-

erhaltung der eingestellten Temperatur benötigte LN_2 -Menge eingespritzt wird. Mit dieser Art der Regelung können nicht nur vorgegebene Temperaturen angefahren und gehalten, sondern auch geregelte Abkühlvorgänge realisiert werden.

Durch die geregelte Einspritzung von LN_2 sind Abkühlgeschwindigkeiten erreichbar, die in der Praxis nur durch Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des abzukühlenden Körpers begrenzt werden. Die in Temperaturzyklen enthaltenen Aufwärmphasen können i.A. mit Hilfe einer eingebauten elektrischen Heizung ebenfalls geregelt gefahren werden, wenn ein dafür geeigneter 3-Punkt-Temperaturregler verwendet wird.

Die hier erforderlichen Regler unterscheiden sich zwar nicht prinzipiell von solchen, wie sie im Normal- oder Hochtemperaturbereich eingesetzt und in einer Vielzahl von Ausführungen angeboten werden, sie müssen in ihrer Charakteristik jedoch den angeschlossenen Kältekammern angepaßt sein. So stellt z.B. ein elektrischer Heizofen i.A. eine relativ träge Regelstrecke dar, die auf Änderungen der zugeführten Heizleistung mit erheblichen Verzögerungen reagiert und daher einen PID-Regler mit entsprechend großen Zeitkonstanten in der Integral- bzw. der Differentialrückführung benötigt. Eine nach dem vorstehend beschriebenen Prinzip arbeitende Kältekammer, bei der die Kälteleistung direkt durch den eingespritzten LN_2 -Nebel an die gewünschten Stellen transportiert wird, stellt dagegen eine sehr schnell reagierende Regelstrecke dar, die nur durch einen Regler mit kleinen Zeitkonstanten optimal, d.h. mit möglichst kleinen Temperaturschwankungen betrieben werden kann. Erschwerend wirkt sich hier der Umstand aus, daß normale Magnetventile keine kontinuierliche Änderung der durchfließenden LN_2 -Menge ermöglichen, sondern nur die Schaltzustände "offen" oder "geschlossen" zulassen. Eine feinfühligere Temperaturregelung mit geringen Schwankungen läßt sich daher nur durch kurze Schaltabstände realisieren, wobei im zeitlichen Mittel die Durchflußmenge durch das Verhältnis der "Auf"- und "Zu"-Zeiten des Magnetventils bestimmt wird.

Für die hier anstehenden Prüfprobleme sind sowohl industriell gefertigte, speziell für den Einsatz an LN_2 -betriebenen Kältekammern konzipierte Temperaturregler als auch entsprechend den o.g. Kriterien modifizierte Standardgeräte oder Eigenkonstruktionen verwendbar.

Zur Erfassung von Temperaturen für Meß-, Regel- und Registrierzwecke im Bereich von $+20$ bis -200°C bieten sich sowohl die klassischen Thermoelemente als auch Widerstandsmeßfühler aus Platindraht (Pt 100) an, wobei bezüglich ihrer Eignung je nach Verwendungszweck differenziert werden muß.

Thermoelemente sind unter Verwendung fertig konfektionierter, isolierter Drahtpaare problemlos in jeder gewünschten Abmessung vom Anwender selbst herzustellen und im Bedarfsfall zu reparieren, vor allem, da bei Tieftemperaturanwendung die Verbindungsstelle der beiden Drähte, die ja das aktive Fühler-element darstellt, als Weichlötstelle ausgeführt sein kann. Außerdem gestatten sie durch ihre geringen Abmessungen punktförmige, trägheitsarme Messungen an nahezu jeder beliebigen Stelle.

Der unproblematischen Anwendung der Thermoelemente selbst steht ein relativ hoher Aufwand auf der gerätetechnischen Seite gegenüber, da für genaue Messungen eine definierte Referenztemperatur benötigt wird, die allerdings auch durch eine elektrische Korrekturschaltung simuliert werden kann. Spezielle Meßverstärker für Thermoelemente, die eine lineare, temperaturproportionale Ausgangsspannung liefern, geraten wegen der geringen Signalspannung und der zu tiefen Temperaturen hin stark unlinearen Kennlinien schaltungstechnisch ebenfalls recht aufwendig.

Solche Probleme treten bei Pt-100-Fühlern kaum auf, da diese große Ausgangssignale mit guter Linearität liefern, keine Referenztemperatur benötigen und überdies wegen der Langzeitstabilität des Edelmetalls Platin höhere Meßgenauigkeit aufweisen. Als nachteilig können sich für bestimmte Anwendungsfälle ihre gegenüber Thermoelementen größeren Abmessungen mit

entsprechend gesteigerter Wärmekapazität erweisen, ebenso wie die geringere mechanische Robustheit der Glas- bzw. Keramikkörper, in die der Platindraht eingebettet ist. Da Widerstandsmeßfühler wesentlich teurer sind als Thermoelemente, kommt dieser zweite Gesichtspunkt vor allem bei Untersuchungen zum Tragen, in deren Verlauf der Prüfling zerstört wird, da hierbei u.U. auch die an ihm angebrachten Meßfühler in Mitleidenchaft gezogen werden. Auch in Fällen, in denen der Meßfühler mit der Probe verklebt werden muß und in der Regel nicht mit vertretbarem Aufwand unbeschädigt wieder entfernt werden kann, stellen Thermoelemente die bei weitem wirtschaftlichere Lösung dar.

2.2. Lastaufbringung bei tiefen Temperaturen

Zur Untersuchung lastabhängiger Verformungen an Baustoffen im Tieftemperaturbereich müssen die von den entsprechenden Prüfmaschinen erzeugten Druck- bzw. Zugkräfte auf die abgekühlten Prüflinge übertragen werden, wobei aus den bereits erörterten Gründen die Prüfmaschinen selbst auf Raumtemperatur bleiben müssen. Zwischen Probe und Prüfmaschine besteht also ein starkes Temperaturgefälle, das an den Berührungsstellen einen Wärmestrom und damit unerwünschte Temperaturveränderungen auslöst, die wegen der kleineren Wärmekapazität vor allem den Prüfling betreffen.

Andererseits ist speziell bei Betonproben mit ihrer im Verhältnis zum Volumen relativ geringen Oberfläche die Wärmekapazität groß genug, um eine allzu schnelle Erwärmung zu verhindern, wenn die abgekühlten Proben wieder normaler Raumtemperatur ausgesetzt werden. Verringert man außerdem durch Zwischenlegen von wärmeisolierenden Schichten, wie z.B. Filz eine gute Wärmekopplung zu den Stempeln der Druckprüfmaschine, so wäre es denkbar, die Untersuchung der Druck- und Spaltzugfestigkeit von Beton bei tiefen Temperaturen recht einfach zu gestalten, indem man die Probe aus der Kältekammer bzw. dem LN_2 -Bad direkt in die Prüfmaschine stellt und sofort abdrückt.

Versuche haben allerdings ergeben, daß selbst durch eine zusätzliche Isolierung der nicht mit der Prüfmaschine in Kontakt stehenden Flächen und die Verwendung zusätzlicher Stahldruckplatten, die vorher mit abgekühlt und dann zwischen Probe und Druckstempel gelegt wurden, eine unzulässig starke Erwärmung der Probe während der Prüfung nicht vermieden werden kann. Um eine einheitliche, definierte Probentemperatur während des Versuchs zu gewährleisten, muß also die Druckprüfung innerhalb des gekühlten Bereichs stattfinden, d.h., die Kühlvorrichtung muß mitsamt dem Probekörper in die Druckpresse eingesetzt werden.

Bei den üblichen Druckprüfmaschinen ist das infolge ihrer hinreichend großen Abmessungen in der Regel problemlos zu realisieren; es müssen lediglich geeignete Verlängerungsstücke für die Druckstempel angefertigt und entsprechende Durchführungsbohrungen in den Wänden der benutzten Kältekammer angebracht werden. Da auch bei dieser Anordnung durch die verlängerten Druckstempel Wärme von außen an den Probekörper herangeleitet wird, diese aber wegen der erforderlichen Festigkeit nicht aus einem Material mit geringer Wärmeleitfähigkeit hergestellt werden können, müssen sie hinreichend weit in den Kammerinnenraum hineinreichen, damit ihre probenseitigen Endabschnitte wenigstens annähernd die Kammertemperatur annehmen können. Eine Verbesserung der Situation kann durch eine Oberflächenvergrößerung (Lamellen) der Druckstempel im Kältekammerinneren erreicht werden.

Für die Konstruktion einer Vorrichtung zur Durchführung von Zugprüfungen an Stählen bei tiefen Temperaturen gelten ganz ähnliche Überlegungen. Auch hier muß die Last über Zwischenstücke mit möglichst hohem Wärmewiderstand durch die Wandisolierung einer Kältekammer auf die Probe übertragen werden. Diese Zwischenstücke, im einfachsten Fall runde Stahlwellen, müssen, da sie Zugkräfte zu übertragen haben, an ihren Enden mit Klemmvorrichtungen zum Einspannen der Stahlproben versehen sein bzw. deren Aufnahme ermöglichen. Diese Einspannvorrichtungen müssen so gestaltet sein, daß den temperaturbedingten Änderungen sowohl ihrer eigenen Materialeigenschaften

als auch denen des Prüflings Rechnung getragen wird, wobei vor allem die Verringerung der plastischen Verformungen infolge von Materialversprödung zu berücksichtigen ist.

2.3. Verformungsmessung bei tiefen Temperaturen

Eine Apparatur zur Erfassung mechanischer Längenänderungen besteht im Normalfall aus zwei Komponenten, nämlich dem eigentlichen aktiven Wegaufnehmer, der die Wegänderung in ein auswertbares, i.A. elektrisches Signal umsetzt sowie einer geeigneten mechanischen Vorrichtung, welche die Verschiebung vom Prüfling auf den Aufnehmer überträgt, ohne selbst zusätzliche, die Messung verfälschende Wegänderungen hinzuzufügen. Diese Unterscheidung ist zwar oft in der Praxis nicht so eindeutig zu vollziehen wie in der Theorie, doch führt sie zu zwei verschiedenen Lösungsmöglichkeiten für die bei der Dehnungsmessung im Tieftemperaturbereich auftretenden Probleme.

Ausgehend von der Tatsache, daß die üblichen, im Raumtemperaturbereich benutzten Wegaufnehmer aus unterschiedlichen Gründen nicht ohne weiteres bei tiefen Temperaturen eingesetzt werden können, besteht ein Lösungsansatz darin, die mechanische Kopplungsvorrichtung zwischen dem - jetzt abgekühlten - Prüfling und dem Wegaufnehmer so zu gestalten, daß sie die Längenänderung durch die Isolierung des gekühlten Bereiches hindurch nach außen in den Raumtemperaturbereich überträgt. Dort können dann die herkömmlichen Aufnehmertypen wie Meßuhren, induktive Wegaufnehmer oder Aufnehmer auf DMS-Basis in ihrem zulässigen Temperaturbereich verwendet werden. Zwar ist in unmittelbarer Nähe der Kühlapparat trotzdem mit größeren Temperaturschwankungen, z.B. durch austretendes, kaltes N_2 -Gas, als bei Raumtemperaturmessungen zu rechnen, doch können diese meist mit geringem Aufwand vom Meßsystem ferngehalten werden.

Die möglichen Fehlerquellen im Bereich des mechanischen Übertragungssystems sind dafür umso größer, da dieses einen Temperaturgradienten von bis zu 200 K ausgesetzt ist und außerdem

Wege im Dezimeterbereich zu überbrücken hat. Bei Konstruktionen aus Metall resultieren daraus beträchtliche Längenänderungen, die nur dann keine Meßwertverfälschung verursachen, wenn sie entweder keine Komponente in Achsenrichtung des Meßsystems beinhalten, oder aber wenn die Messung bei konstanter Temperatur durchgeführt wird, so daß nur lastabhängige Verformungen auftreten können.

Wesentlich günstiger verhält sich hier Quarzglas, dessen kleiner thermischer Dehnungskoeffizient oft sogar bei Temperaturänderungen vernachlässigt werden kann, das jedoch mechanisch nur wenig beanspruchbar ist. Bei Untersuchungen lastabhängiger Verformungen bis hin zum Versagen des Prüflings ist Quarzglas wegen der dabei auftretenden großen Kräfte kaum verwendbar. Allerdings muß auch bei der Ausführung des Übertragungssystems aus metallischen Werkstoffen ein Kompromiß zwischen mechanischer Belastbarkeit einerseits und möglichst geringer Masse andererseits gewählt werden, um Beeinflussungen des Prüflings durch das Meßsystem gering zu halten.

Der Versuch, die durch ein aus der gekühlten Zone herausführendes Meßgestänge verursachten Probleme zu umgehen, führt als zweite Möglichkeit der Dehnungsmessung bei tiefen Temperaturen zur Verlegung des gesamten Meßsystems einschließlich Wegaufnehmer in den kalten Bereich hinein. Bei dieser Anordnung kann das Verbindungssystem zwischen Prüfling und Wegaufnehmer relativ klein und leicht gestaltet werden, da nur kurze Entfernungen zu überbrücken sind. Dies ist, unabhängig von temperaturspezifischen Problemen, ohnehin von Vorteil für die Meßgenauigkeit, da senkrecht zur Meßrichtung verlaufende Wegänderungen wie sie z.B. bei leicht gekrümmten Stahlproben auftreten, sich umso weniger bemerkbar machen, je geringer der seitliche Versatz des Meßsystems gegenüber der Probe ist. Aber auch Fehler durch thermische Eigendehnung können sich auf kurzen Strecken absolut gesehen weniger stark auswirken. Bei Messungen, die unter Konstanthaltung der Temperatur durchgeführt werden, lassen sie sich sogar völlig eliminieren,

da hier keine Temperaturgradienten innerhalb des Meßsystems auftreten, die die rasche Einstellung eines thermisch homogenen, stabilen Zustandes beeinträchtigen könnten.

Allerdings läßt sich diese, von der Mechanik her unproblematischere Methode der Dehnungsmessung direkt an dem gekühlten Probekörper nur realisieren, wenn es gelingt, Wegaufnehmer zu finden, die einerseits im Bereich bis -200°C genau und zuverlässig arbeiten und andererseits auch den übrigen, an das jeweilige Meßsystem gestellten Forderungen genügen.

Hier bietet sich zunächst einmal die Verwendung von Dehnungsmeßstreifen (DMS) an, deren Funktion bekanntlich auf der elektrischen Widerstandsänderung einer auf eine Trägerfolie aufgebrachten, dünnen metallischen Leiterbahn bei deren Verformung beruht. Der mechanische Applikationsaufwand und die daraus resultierenden Fehlermöglichkeiten sind minimal, da DMS einfach auf eine hinreichend glatte Oberfläche aufgeklebt werden, wozu auch spezielle Tieftemperaturkleber zur Verfügung stehen. Das Fehlen jeglicher mechanisch beweglicher Teile, deren Funktion durch Kälteeinwirkung beeinträchtigt werden könnte, bewirkt eine hohe Betriebssicherheit. Außerdem zeichnen sich DMS durch geringen Platzbedarf und minimale Massen aus, so daß sie praktisch an beliebiger Stelle ohne Beeinflussung des Prüflings angebracht werden können.

Ein wesentliches Problem besteht jedoch in der Tatsache, daß die zur Dehnungsmessung herangezogene Materialeigenschaft der DMS, der elektrische Widerstand, selbst stark temperaturabhängig ist. Zwar werden von einigen Herstellern spezielle Tieftemperatur-DMS auf CrNi-Basis anstatt des üblicherweise verwendeten Konstantans angeboten, doch ist auch bei diesen die Verwendung eines weiteren DMS zur Temperaturkompensation notwendig, welcher i.A. auf einen zweiten, unbelasteten Probekörper, der sich ebenfalls in der Kühlapparatur befindet, appliziert wird [7, 8]. Eine hinreichend exakte Temperaturgleichheit ist zwar

damit wegen der mechanischen und somit auch thermischen Ankopplung des eigentlichen Probekörpers an die Prüfmaschine, die bei der Referenzprobe fehlt, noch nicht automatisch gewährleistet, kann bei konstant gehaltener Temperatur mit entsprechender experimenteller Sorgfalt jedoch erreicht werden. Bei Messungen mit variablem Temperaturverlauf ist diese Forderung allerdings kaum noch zu erfüllen, da schon geringe Differenzen der thermischen Parameter beider Probekörper das Auseinanderlaufen ihrer Temperaturen und damit Verfälschungen der Dehnungsmessung zur Folge haben.

Die sonst vorteilhaften, geringen Abmessungen der DMS kommen bei der Dehnungsmessung an Stählen als wesentlicher Nachteil wegen der dadurch bedingten, relativ kleinen Meßlänge zum Tragen. Für die gesamte Probe repräsentative Meßwerte, die nicht durch zufällig erfaßte, lokale Materialinhomogenitäten verfälscht sind, können mitunter nur durch die gleichzeitige Dehnungsmessung an mehreren Stellen erhalten werden, was einen entsprechend hohen Aufwand an DMS und den zugehörigen Peripheriegeräten erfordert. Die gezielte Erfassung der infolge von Einschnürung stark erhöhten Dehnung in der Nähe der späteren Bruchstelle ist kaum möglich, da diese Stelle nicht vorher bestimmt werden kann und somit der Stahl lückenlos mit DMS belegt sein müßte. Auch überschreiten die im Einschnürbereich auftretenden Dehnungen im Normalfall den Meßbereich üblicher DMS.

Zur Dehnungsmessung an Litzen scheiden direkt applizierte DMS ohnehin aus, da die durch die verdrehten Einzeldrähte geprägte Oberflächenform ein sachgemäßes Aufkleben nicht gestattet. Hier ist der Einsatz einer an die Litze angeklemmten mechanischen Vorrichtung denkbar, die deren Längenänderung auf den DMS überträgt. Dies kann durch Verwendung eines elastischen, auf Biegung beanspruchten Zwischenstücks in Art einer Blattfeder geschehen, dessen Oberflächendehnung mit dem DMS gemessen wird. Eine solche Konstruktion ermöglicht, da sie eine bestimmte Wegänderung mit einem wählbaren Übersetzungsverhältnis

in eine andere umsetzt, die freie Wahl großer Meßlängen und damit eine integrale Dehnungsmessung über mehrere Schlaglängen, wie sie für die Zugprüfung von Litzen vorgeschrieben ist.

Da dieses mechanische Übertragungssystem keinerlei gegeneinander verschiebbare Teile enthält, die durch die Kälteeinwirkung klemmen oder bei Vorhandensein von Feuchtigkeit festfrieren können, ist im Normalfall eine hohe Betriebssicherheit gegeben, bei Belastung des Prüflings bis zum Bruch können Beschädigungen jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Bezüglich des Temperatureinflusses der in einem solchen Meßsystem verwendeten DMS gelten natürlich die gleichen Überlegungen wie bei deren direkter Applizierung. Da das System jedoch wiederverwendbar ist, kann ein höherer Aufwand beim Anbringen der DMS in Kauf genommen werden, so daß i.A. die wenig temperaturempfindliche Vollbrückenschaltung mit vier aktiven DMS benutzt wird. Andererseits müssen hier die immer vorhandenen Temperatureinflüsse des mechanischen Systems berücksichtigt werden, so daß eine problemlose Handhabung wiederum nur bei konstant gehaltener Temperatur gewährleistet ist.

Als schwerwiegendste Nachteile des hier beschriebenen Meßsystems sind im Vergleich mit direkt applizierten DMS der wesentlich höhere Platzbedarf sowie ggf. die große, mit dem Prüfling gekoppelte Masse zu nennen. Dazu ist allerdings anzumerken, daß diese Nachteile auch der zweiten Gruppe gängiger Dehnungsmeßfühler, nämlich den induktiven Wegaufnehmern, anhaften, die ohne eine mechanische Kopplungsvorrichtung zu dem Prüfling überhaupt nicht betrieben werden können. Hier wird noch einmal deutlich, daß die DMS mit ihren zwei unterschiedlichen Applikationsmöglichkeiten eine Ausnahmestellung einnehmen.

Die Wirkung von induktiven Wegaufnehmern beruht auf der Verschiebung eines magnetisierbaren Kerns - auch Tauchanker genannt - in einer Spule mit Mittelanzapfung, die die eine Hälfte

einer induktiven, mit Wechselstrom gespeisten Brückenschaltung bildet, welche durch die gegenläufigen Induktivitätsänderungen der Spulenhälften verstimmt wird. Bei geeigneter Dimensionierung ist die Brückenspannung der Kernverschiebung direkt proportional, sie kann entweder unmittelbar gemessen werden oder zur Steuerung der Wegachse eines X-Y-Schreibers bei der Aufzeichnung von Spannungs-Dehnungs- bzw. Temperatur-Dehnungs-Kennlinien dienen. Da die Induktivität einer Spule nur von Größen bestimmt wird, die in erster Näherung temperaturinvariant sind, arbeiten induktive Wegaufnehmer prinzipiell temperaturunabhängig und bieten sich daher zur Dehnungsmessung im Tieftemperaturbereich an [9].

Erhebliche tieftemperaturspezifische Probleme werfen allerdings die bereits erwähnten, unbedingt notwendigen mechanischen Koppelvorrichtungen auf, die die zu messende Dehnung von der Probe auf das System Spulenkörper-Tauchanker zu übertragen haben. Bei der weiteren Betrachtung dieser Probleme muß zwischen den beiden typischen, mechanisch verschiedenen Ausführungsformen von induktiven Wegaufnehmern unterschieden werden.

Bei der einfacheren Form sind der Spulenkörper mit den Kabelanschlüssen und der Tauchanker mechanisch völlig voneinander unabhängig und werden jeder für sich am Prüfling befestigt, wobei der Tauchanker i.A. am Ende eines dünnen, nicht magnetischen Stahldrahtes angebracht ist. Der Abstand der Befestigungspunkte, die, z.B. durch Schneiden, genau definiert sein müssen, stellt die Meßbasis dar und kann in weiten Bereichen variiert werden. Zwar ist die Berührung des Tauchankers mit der Innenwandung des Spulenkörpers ohne Beeinträchtigung der Funktion zulässig, jedoch kann durch sorgfältige Zentrierung eine völlig berührungslose Verschiebung des Kerns erreicht werden, so daß jegliche mechanische Effekte wie Schwergängigkeit oder völliges Festklemmen oder Festfrieren des Tauchankers von vornherein vermieden werden. Einige der auf dem Markt angebotenen derartigen Wegaufnehmer sind daher auch

bereits vom Hersteller für die Verwendung im Temperaturbereich bis -200°C spezifiziert, wodurch eine unproblematische Beschaffung und Anwendung gewährleistet ist.

Die prinzipiell hohe Meßgenauigkeit von induktiven Wegaufnehmern wird bei dem hier beschriebenen Meßsystem eingeschränkt durch die aus der thermischen Eigendehnung der Übertragungsmechanik resultierenden Meßwertverfälschungen, die in erster Linie von dem den Tauchanker tragenden Stahldraht herrühren, da dieser die gesamte Meßbasis zu überbrücken hat. Falls es die Versuchsbedingungen zulassen, sollte der Stahldraht durch einen Quarzglasstab ersetzt werden, was dann auch Dehnungsmessungen bei veränderlicher Temperatur möglich macht. Da die Verwendung von Quarzglas mit seiner hohen Bruchempfindlichkeit aus bereits erwähnten Gründen jedoch meist nicht möglich ist, bleibt der Einsatz von induktiven Wegaufnehmern mit separatem Tauchanker i.A. auf Messungen bei konstanter Temperatur beschränkt.

Trotzdem kann es zu Beschädigungen am Meßsystem kommen, wenn beim Versagen des Prüflings Spulenkörper oder Tauchanker gewaltsam aus ihrer zueinander konzentrischen Lage ausgelenkt werden. Weitere Kritikpunkte sind der hohe Arbeitsaufwand zur genauen Justierung des Tauchankers sowie die zusätzliche Belastung des Prüflings mit der gesamten Masse des Aufnehmersystems

Unter diesen zuletzt genannten Gesichtspunkten betrachtet, erscheint die Verwendung der anderen Art induktiver Wegaufnehmer, der sogenannten Wegtaster, vorteilhafter. Bei diesen ist in das Spulengehäuse ein axial verschiebbarer, gefederter Taststift integriert, der an dem in die Spule hineinragenden Ende den Tauchanker trägt. Das andere Ende ist meist mit einer kleinen Hartmetallkugel bestückt und wird von einer Spiralfeder gegen das Werkstück gedrückt, dessen Verschiebung gemessen werden soll. Dadurch entfällt die separate Befestigung und Justierung des Tauchankers ebenso wie die Gefahr, daß sich dieser im Spulenkörper verkantet und beschädigt wird.

Die Beschädigungsgefahr läßt sich weiter reduzieren, indem am Prüfling selbst nur eine kleine Auflagefläche für den Taststift angebracht wird und der Wegtaster selbst eine vom Prüfling unabhängige Halterung besitzt, in der er vor dessen Bruch aus der Gefahrenzone herausgezogen oder -geschwenkt werden kann. Der Prüfling wird dabei nur mit der Masse der Auflagefläche belastet, die sehr gering gehalten werden kann.

Eine echte Dehnungsmessung über eine frei wählbare definierte Meßlänge läßt sich durchführen, indem der Prüfkörper an jedem Ende der Meßbasis mit einer Auflagefläche versehen wird. Mit zwei Wegtastern werden die jeweiligen Verschiebungen gegenüber deren gemeinsamer Halterung als neutralem Bezugssystem gemessen und daraus die Differenz gebildet, die dann die auf die Meßbasis bezogene Längenänderung darstellt. Die Halterung der Wegtaster kann, da es in diesem Fall weder auf geringe Massen ankommt, noch große Kräfte seitens des Prüflings aufgefangen werden müssen, im wesentlichen aus hinreichend stabil dimensioniertem Quarzglas hergestellt werden, so daß sich die Eigendehnung des Meßsystems auf ein erträgliches Maß reduzieren läßt.

Die grundsätzlichen funktionellen Vorzüge induktiver Wegtaster auf die Tieftemperaturanwendung zu übertragen bereitet allerdings erhebliche Schwierigkeiten, da kein Hersteller gefunden werden konnte, der Wegtaster für Gebrauchstemperaturen von weniger als -40°C liefert. Umfangreiche eigene Untersuchungen bestätigten, daß die meisten der geprüften Exemplare im Bereich zwischen -50°C und -80°C versagen, da der gefederte Taststift erst schwergängig wird und schließlich völlig festklemmt. Als Ursachen ergaben sich neben dem Viskositätsverlust der Schmiermittel die unterschiedlichen Temperaturdehnungskoeffizienten der aus Edelstahl bestehenden Taststifte und deren meist aus Sinterbronze gefertigten Gleitlager.

Lediglich ein Hersteller liefert Wegtaster, deren Taststifte in völlig aus Edelstahl bestehenden Miniaturkugellagern geführt sind. Nachdem ein zur Abdichtung gegen Schmutzteilchen

dienender Faltenbalg aus Gummi entfernt und das Schmierfett aus den Kugellagern herausgewaschen und durch Graphitpulver ersetzt worden war, erwies sich dieser Wegtaster entgegen den Herstellerangaben als tauglich für den Betrieb im Bereich bis -180°C . Allerdings bedarf es auch bei diesem Typ gewisser Vorsichtsmaßnahmen, um ein Festfrieren des Taststifts infolge eingedrungenen Luftfeuchtigkeit zu vermeiden, besonders, wenn der Wegaufnehmer abwechselnd in kurzen Abständen Temperaturen unter- und oberhalb von 0°C ausgesetzt wird.

Einen Schwachpunkt stellt auch das fest installierte, PVC-isolierte Anschlußkabel dar, das im kalten Zustand möglichst wenig bewegt werden darf, da sonst infolge von Materialversprödung und inneren Spannungen Teile der Isolierung abplatzen. Läßt sich die Bewegung der Kabel nicht vermeiden, weil z.B. die Wegaufnehmer von der Probe weggezogen werden sollen, so müssen sie so verlegt werden, daß sich die größtmöglichen Biegeradien ergeben.

Der Vollständigkeit halber sei als letzte Methode zur Dehnungsmessung an tiefkalten Proben die Verwendung von Setzdehnungsmessern erwähnt, wobei sowohl die rein mechanische, mit einer Meßuhr ausgestattete Ausführung in Frage kommt als auch diejenige, die einen elektrischen Aufnehmer als aktives Element besitzt. Der Vorteil solcher Geräte besteht vor allem in dem geringen Aufwand, der zur Vorbereitung der Messung an der Probe notwendig ist, denn es brauchen lediglich zwei Meßmarken in definiertem Abstand aufgeklebt werden. Die Messung selbst gerät dafür umso aufwendiger, da die Dehnung nicht kontinuierlich und selbsttätig aufgezeichnet werden kann, sondern bei jeder gewünschten Temperatur die Kühlvorrichtung geöffnet, der Setzdehnungsmesser auf die Meßmarken gesetzt und der Meßwert abgelesen und notiert werden muß. Dabei treten sowohl an der Probe als auch am Meßgerät Temperaturschwankungen auf, die die Meßwerte in unkontrollierbarer Weise verfälschen können, so daß diese Methode nur in Ausnahmefällen Anwendung finden kann.

Im Zusammenhang mit den fest installierten Meßsystemen wurden bereits des öfteren Klemmvorrichtungen zur Befestigung an den

Probekörpern erwähnt. Die jeweilige Ausführung wird vom Material und der Form der Probe sowie dem verwendeten Dehnungsaufnehmer bestimmt, jedoch muß in jedem Fall die effektive Meßlänge genau definiert sein. Dies wird i.A. dadurch erreicht, daß die in Berührung mit dem Probekörper stehenden Teile der Vorrichtung in Form von Schneiden bzw. spitzen Schrauben ausgeführt sind, wobei ein geeigneter Kompromiß zwischen ausreichend festem Sitz des Meßsystems einerseits und möglichst geringer Beschädigung des Prüflings andererseits zu wählen ist. Insbesondere ist eine mögliche Änderung der Andruckkräfte beim Abkühlen durch unterschiedliche Dehnungskoeffizienten von Probenmaterial und den einzelnen Komponenten der Klemmvorrichtung zu berücksichtigen.

3. Praktische Ausführung der Prüfeinrichtungen

Ausgehend von den im vorangegangenen Kapitel erläuterten Anforderungen an Apparaturen zur Tieftemperaturmaterialprüfung von Baustoffen sowie den diskutierten Lösungsmöglichkeiten wurden verschiedene Prüfvorrichtungen entwickelt, aufgebaut und praktisch erprobt. Wegen der sehr unterschiedlichen Probendimensionen und Materialeigenschaften mußten zur Untersuchung lastabhängiger Verformungen für Beton und Stahl getrennte Apparaturen erstellt werden, während die Vorrichtung zur Prüfung temperaturabhängiger Verformungen so gestaltet werden konnte, daß sie Messungen an beiden Materialien ermöglicht. Die einzelnen Konstruktionen werden in den Ausführungsformen, die sich im Zuge der praktischen Erprobung als die jeweils zweckmäßigsten erwiesen, im folgenden detailliert beschrieben.

3.1. Untersuchung lastabhängiger Verformungen an Stahl bei tiefen Temperaturen

Die Rahmenbedingungen für den Entwurf einer Vorrichtung, die Durchführung von Zugversuchen und die Aufnahme von Spannungs-Dehnungs-Kennlinien bei tiefen Temperaturen gestattet, wurden

durch die Probendimensionen und die zu verwendende Zugprüfmaschine gesetzt. In eine Universalprüfmaschine mit 1000 kN Maximallast sollten glatte und profilierte Stähle sowie Litzen mit den gängigen, im Bauwesen verwendeten Durchmessern von etwa 6 - 18 mm eingespannt werden können, wobei durch die Maschine eine vertikale Probenanordnung vorgegeben war. Um die in der Euronorm für die Zugprüfung von Litzen geforderte Mindestmeßlänge von 500 mm sowie einen beiderseitigen Abstand zwischen Meßbasis und Einspannung von wenigstens einer Schlaglänge einhalten zu können, wurde die Probenlänge einheitlich auf 1000 mm festgelegt.

3.1.1. Erzeugung und Regelung der Versuchstemperatur

Zur Durchführung orientierender Vorversuche wurde eine provisorische Kälteapparatur aufgebaut, die mit sehr geringem, werkstattmäßigem Aufwand Zugprüfungen von Stählen und Litzen bei der LN_2 -Siedetemperatur von ca. -196°C ermöglicht. Sofern eine Beschränkung auf diese eine Temperatur möglich ist und nur wenige Versuche durchgeführt werden sollen, kann eine solche Konstruktion, da sie schnell und kostengünstig aufzubauen ist, durchaus empfohlen werden.

Die Last wird von der Prüfmaschine über zwei in deren Klemmbacken eingespannte Stahlwellen auf zwei ebenfalls aus Stahl gefertigte Spannköpfe übertragen, in welche der zu prüfende Stahlabschnitt mittels Klemmkeilen und Hülsen eingehängt wird (s. Abb. 1 u. 2). Die Kühlung erfolgt durch LN_2 , welcher sich in zwei die Spannköpfe umgebenden Gefäßen aus Stahlblech befindet. Beide Gefäße sind mit mehreren Lagen Styropor kälteisoliert. Das untere Gefäß ist direkt mit dem Spannkopf verschweißt, das obere besitzt im Boden eine konische Bohrung zur Durchführung des Prüflings. Diese Bohrung wird mit einem durchgebohrten und vorher auf den Stahlabschnitt geschobenen Gummistopfen abgedichtet.

Durch ein definiertes Leck in der konischen Probendurchführung des oberen Topfes läßt sich erreichen, daß LN_2 am Prüfling

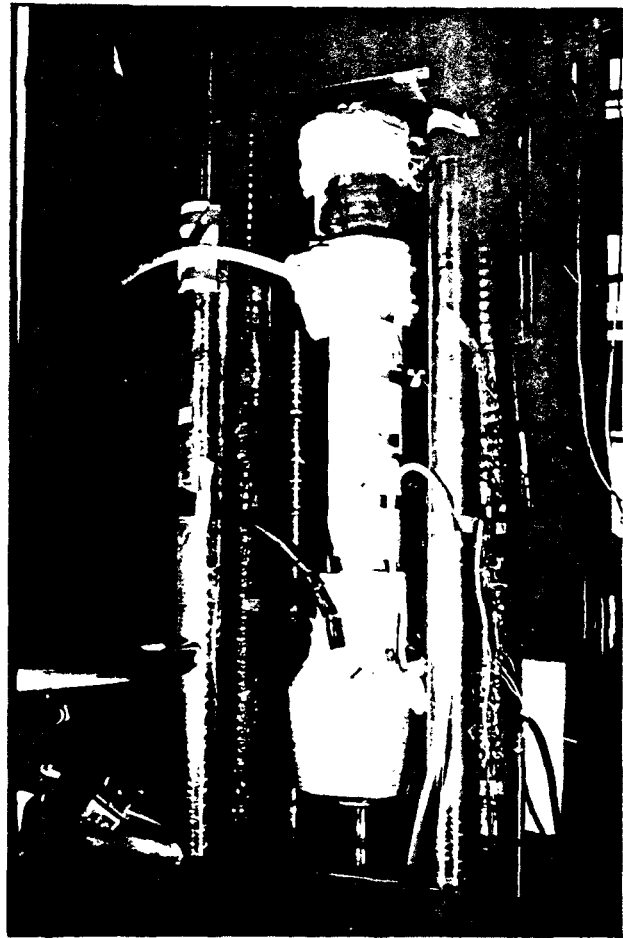
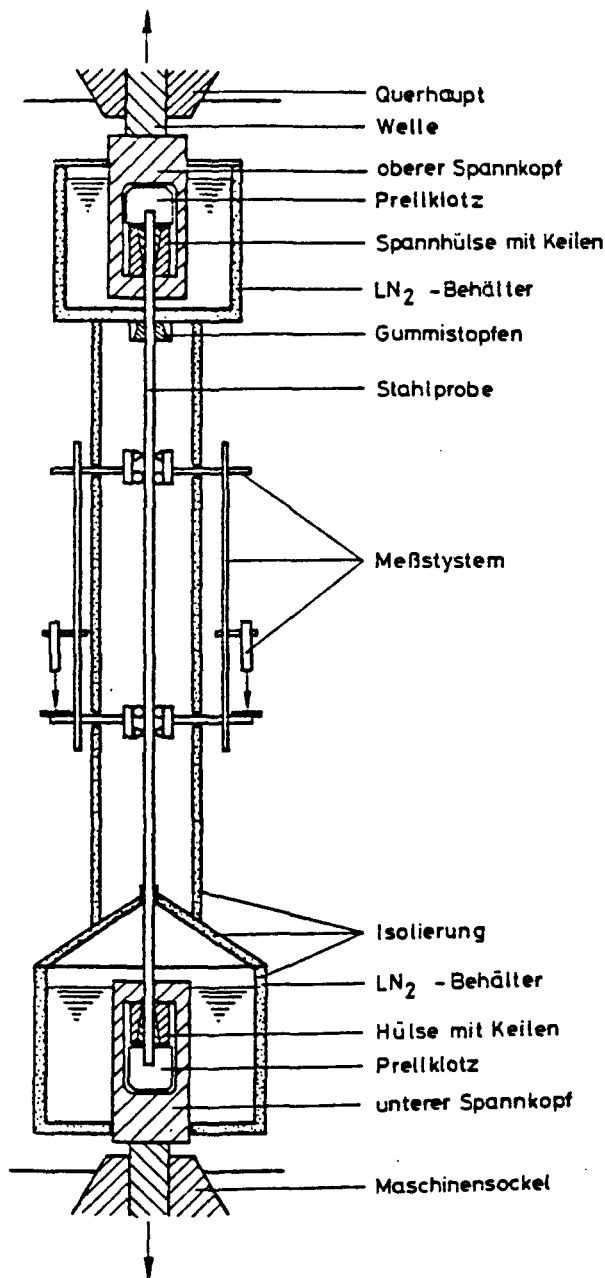


Abb. 2: Apparatur für die Zugprüfung von Stählen bei -196°C , in die Prüfmaschine eingebaut

Abb. 1: Prinzipskizze einer Apparatur für die Zugprüfung von Stählen bei -196°C

herunterrinnt und ihn mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm umgibt. Dadurch wird erreicht, daß nicht nur die im LN_2 -Bad stehenden Spannköpfe, sondern auch die Zugprobe exakt die Temperatur von -196°C besitzt. Das herabrinnende LN_2 wird von dem Kühlgefäß der unteren Einspannung aufgefangen. Die Isolierung der Probe erfolgt dabei durch zylindrische Halbschalen aus Styropor (Innen- \varnothing ca. 80 mm), die auf der kegelförmigen Abdeckung des

unteren LN_2 -Gefäßes aufsitzen. Das obere Gefäß wird oberseitig mit Styropor gegen Temperaturverluste isoliert.

Zur Kontrolle der Temperaturen sind an jedem Spannkopf zwei Thermoelemente in verschiedener Höhe angebracht, die dadurch gleichzeitig als grobe Füllstandsanzeige für den flüssigen Stickstoff dienen. Mehrere über die Länge der Stahlprobe verteilt angeklebte Thermoelemente geben Auskunft darüber, zu welchem Zeitpunkt die Probe bis in den unteren Einspannbereich durchgekühlt ist. Da die Temperatur durch den Siedepunkt des LN_2 vorgegeben ist, sind keine besonderen Regelvorrichtungen notwendig. Bei längerer Versuchsdauer muß lediglich das obere Gefäß regelmäßig nachgefüllt werden. Für das untere Gefäß reicht nach einmaligem Befüllen die an der Probe herunterlaufende Flüssigkeitsmenge aus, um die Verdampfungsverluste zu kompensieren.

Um auch bei der Durchführung von Litzen durch die Bohrung des oberen LN_2 -Gefäßes eine definierte Leckrate einstellen zu können, wird in diesem Bereich ein kurzer Stahlrohrabschnitt mit glatter Oberfläche über die Probe geschoben und mit Epoxidharz vergossen. Stähle mit profilierter Oberfläche können in der gleichen Weise präpariert werden wie Litzen. Die zur Bildung des LN_2 -Filmes auf den zu kühlenden Proben erforderlichen Leckstellen in der Durchführung lassen sich sehr einfach durch das Einschieben von dünnem Kupferdraht in den Spalt zwischen Probe und Gummistopfen der Durchführung herstellen.

Versuche, in dieser Apparatur Zugprüfungen bei Temperaturen oberhalb von -196°C durchzuführen, indem der Prüfling statt mit flüssigem Stickstoff durch kaltes N_2 -Gas gekühlt wurde, das durch gesteuertes Verdampfen des LN_2 im unteren Gefäß entstand, verliefen nicht zufriedenstellend. Da außerdem der Arbeitsaufwand für den Ein- und Ausbau der Proben relativ hoch war, wurde eine neue Apparatur entwickelt und aufgebaut, die die rationelle Prüfung von Stählen bei jeder beliebigen Temperatur zwischen $+20^\circ\text{C}$ und -196°C ermöglicht. Dabei wurde

auf das bei handelsüblichen Kältekammern bewährte Prinzip der geregelten Einspritzung und Verwirbelung von LN_2 -Dampf im Probenraum zurückgegriffen.

Die Konstruktion besteht im wesentlichen aus einer doppelwandigen, wärmeisolierten Kammer, deren Innenraum in drei übereinanderliegende, getrennte Bereiche unterteilt ist, die unabhängig voneinander gekühlt werden. Diese Unterteilung ermöglicht es, die Probenverankerung auf eine niedrigere Temperatur abzukühlen als den mittleren Prüfbereich. Infolge der mit sinkender Temperatur ansteigenden Festigkeit des Stahls wird erreicht, daß die Proben im Prüfbereich und nicht durch Oberflächenbeschädigungen im Bereich der Verankerung (Keile) versagen. Auf diese Weise lassen sich Einspannungsbrüche auf ein Minimum beschränken.

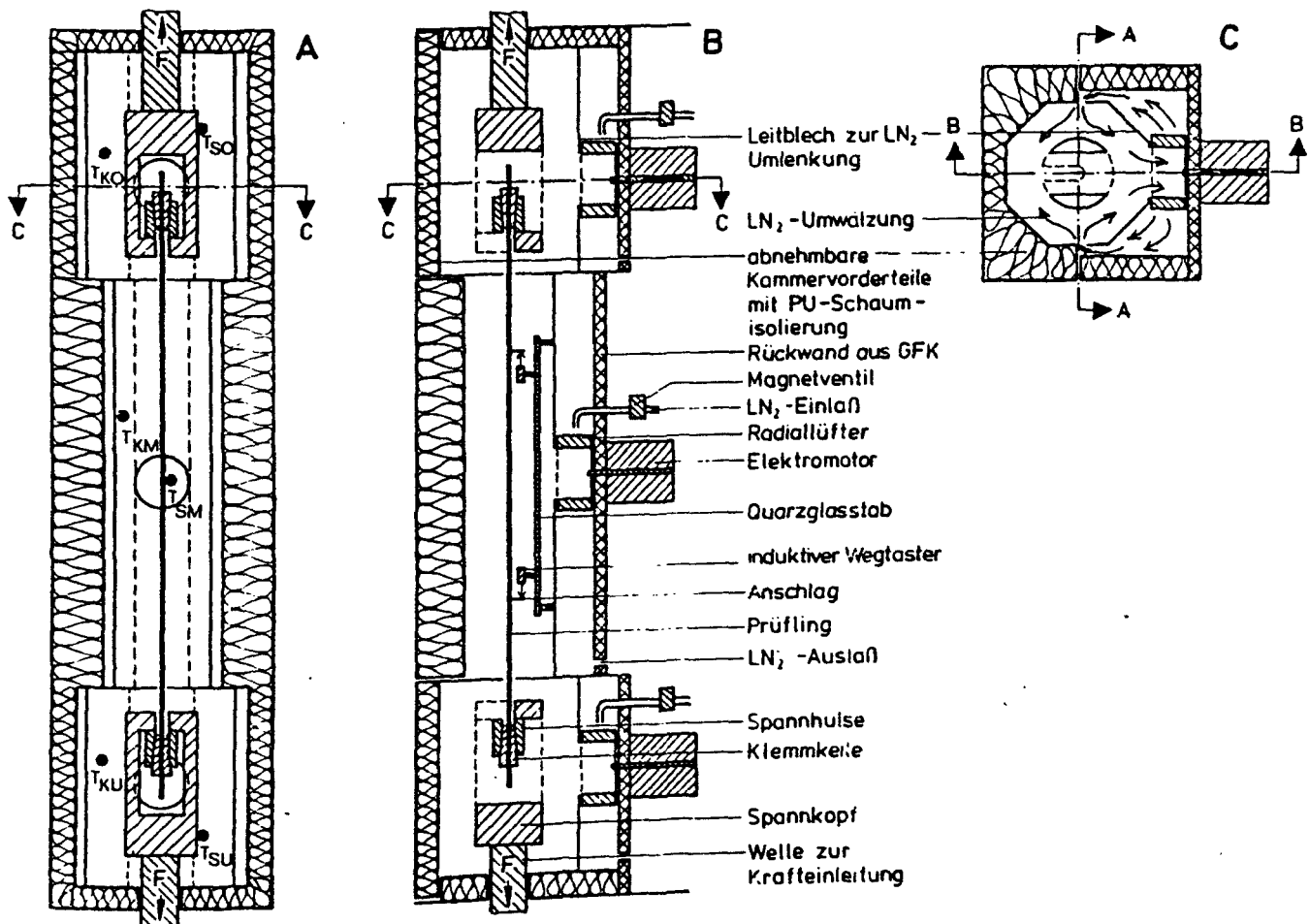


Abb. 3: Dreiteilige Kältekammer für Zugversuche an Stahlproben im Temperaturbereich +20 bis -180°C

Zwecks guter Zugänglichkeit des Innenraumes ist die Kammer längs ihrer Mittelachse, die mit der Lage der eingebauten Stahlprobe identisch ist, in der ganzen Höhe teilbar. Das abnehmbare Vorderteil ist wiederum dreifach unterteilt, so daß jeder einzelne Kammerbereich seine eigene Abdeckung besitzt. Der hintere Kammerteil, der sämtliche zur Kälteerzeugung notwendigen Aggregate und Anschlüsse trägt, wird fest in der Zugprüfmaschine installiert.

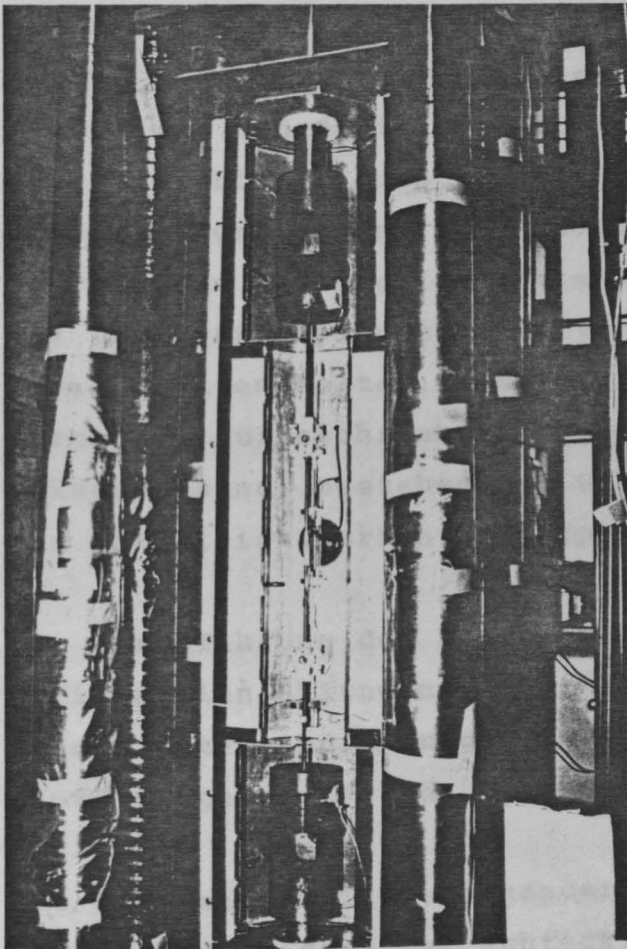


Abb. 4: Kältekammer in Prüfmaschine mit Probe und Meßsystem, vollständig geöffnet

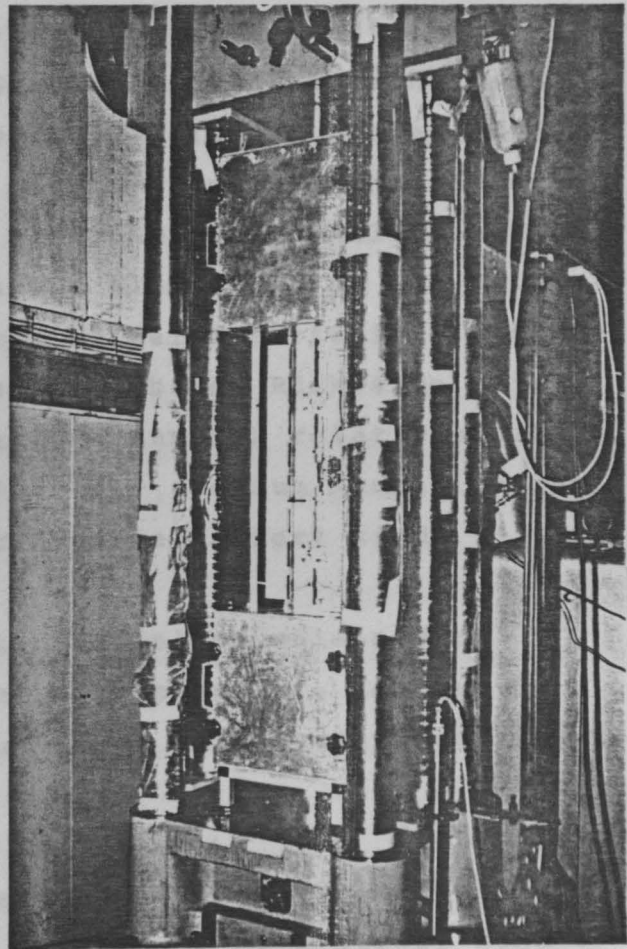


Abb. 5: Kältekammer in Prüfmaschine mit Probe und Meßsystem, obere und untere Abdeckung aufgesetzt

Als tragendes Element dient ihm, genau wie den drei vorderen Abdeckungen je ein Rahmengestell aus Aluminium-Kastenprofilen quadratischen Querschnitts, die mit Eckverbindern und T-Stücken zusammengesetzt sind. Die Außen- und Innenwände bestehen aus aufgeschraubten Alu-Blechen, wobei die Zwischenräume zur Wärmeisolierung mit Polyurethan ausgeschäumt sind.

Für die weitgehende Verwendung von Aluminium sprechen seine gute Bearbeitbarkeit, das niedrige Gewicht sowie die geringe Korrosionsanfälligkeit. Dieser letzte Gesichtspunkt ist wegen der an kalten Oberflächen unvermeidlichen Kondenswasserbildung besonders wichtig, so daß die einzige Alternative im Einsatz von Edelstahl bestanden hätte, der wiederum schwerer, teurer und schwieriger zu bearbeiten ist.

Für die Auflageflächen der abnehmbaren Vorderteile wurde ein tieftemperaturbeständiger glasfaserverstärkter Kunststoff gewählt, der bei relativ geringem Gewicht eine hohe mechanische Festigkeit und damit Sicherheit vor Verwellungen bietet, die eine unproblematische Abdichtung dieser Trennflächen sehr erschweren würden. Der GFK besitzt außerdem einen ähnlichen thermischen Dehnungskoeffizienten wie Aluminium, so daß sich die Temperaturspannungen im Verbund beider Materialien in tragbaren Grenzen halten. Auch die demontierbaren Rückwände, die durch die aufgeschraubten Aggregate mechanisch relativ stark belastet sind, bestehen aus GFK-Platten, die zum Kammerinneren hin mit gleichstarken Asbestplatten wärmeisoliert sind.

Zur Durchführung der krafteinleitenden Wellen weisen die horizontalen Stirnwände der Kammer Bohrungen auf, in die zwecks guter Abdichtung Hülzen aus einem kältebeständigen Kunststoff eingesetzt sind.

Die drei vertikal übereinanderliegenden Innenräume sind von ihren Grundflächen her achteckig gestaltet; dies stellt eine fertigungstechnisch einfacher zu realisierende Annäherung an die durch die zylindrische Form der Spannköpfe vorgegebene Rotationssymmetrie dar. Der kleinste Kammerdurchmesser beträgt, in den oberen und unteren Innenräumen je 230 mm, die Höhe unten 350 mm und oben, wo der Spannkopf bei der Zugprüfung einen der Gesamtdehnung des Prüflings entsprechenden Weg macht, 400 mm. Im mittleren Bereich, der nur der Probe und dem Dehnungsmeßsystem Platz bieten muß, wurde der Durchmesser auf 150 mm verringert, um trotz der Höhe von 650 mm kein größeres abzukühlendes Volumen zu erhalten. Zur Isolierung der einzelnen

Kammerbereiche gegeneinander genügt dünnes Alu-Blech, da die auftretenden Temperaturdifferenzen maximal 30 K betragen. Außerdem werden Temperaturänderungen in einer der Teilkammern ohne hin durch deren jeweils eigenes Reglersystem wieder ausgeglichen.

Die Arbeitsweise der Kältekammer wird am deutlichsten in Schnitt C von Abb. 3. Ein hinter einer Öffnung in der hinteren Innenwand rotierender und von einem außenliegenden Elektromotor angetriebener Radiallüfter saugt das in der Kammer befindliche Gas an, drückt es durch die seitlichen Kanäle, die in vertikalen Schlitzten direkt hinter der Trennstelle zu dem abnehmbaren Vorderteil münden, wieder in die Kammer zurück und bewirkt so eine rasche und intensive Umwälzung. Im Kühlbetrieb öffnet der Temperaturregler das auf der Rückwand angebrachte Magnetventil, wodurch LN_2 aus einer angeschlossenen Kanne über eine Rohrleitung unmittelbar auf das Lüfterrad gespritzt wird und so in vernebelter Form in den Umwälzkreislauf gelangt. Der durch die drastische Volumenvergrößerung des verdampfenden Stickstoffs entstehende Überdruck kann sich durch eine Bohrung in der Rückwand abbauen. Ein im Kammerinneren angebrachter Pt 100-Temperaturfühler liefert das Istwertsignal T_k für den Temperaturregler, je ein FeKo-Thermoelement erfaßt die Temperatur T_s der Spannköpfe bzw. der Stahlprobe. Ein konzentrisch zum Lüfterrad angebrachter Rohrheizkörper mit einer Leistung von 1000 W ermöglicht im Bedarfsfall eine rasche Erwärmung der zirkulierenden Gasmenge. Die hier für einen der drei Teilabschnitte der Kammer beschriebene Temperiervorrichtung ist in dreifacher Ausführung vorhanden, so daß jeder Teilabschnitt völlig unabhängig von den anderen betrieben werden kann.

Das Temperaturregelsystem besteht daher ebenfalls aus drei identischen Reglereinheiten, die als wesentlichste Komponente je einen handelsüblichen PID-Zweipunktregler enthalten. Dieser vergleicht die mit dem Pt-100-Fühler gemessene Kammertemperatur T_k mit einem zwischen $+50$ und -200°C einstellbaren Sollwert und bildet aus der Differenz das Schaltsignal für das Magnetventil in der LN_2 -Zuleitung. Die Zeitkonstanten der Regler-rückführung wurden entsprechend der Charakteristik der Kälte-

kammer soweit verkleinert, daß innerhalb des Proportionalbereiches durch kurze Schaltabstände und Variation des Verhältnisses zwischen Ein- und Ausschaltzeit eine feinfühligere Regelung erreicht wird. Da der Temperaturfühler eine wesentlich kleinere Wärmekapazität besitzt als die Stahlprobe und damit auch empfindlicher auf Änderungen der Kammertemperatur reagiert, sind die Temperaturschwankungen der Probe mit Sicherheit vernachlässigbar. Die Spannköpfe zur Probenverankerung mit ihrer großen Masse verhalten sich in dieser Hinsicht noch unproblematischer.

Es handelt sich hier also um eine indirekte Regelung, da die konstant zu haltenden Temperaturen der Probe und ihrer Verankerungen nur auf dem Umweg über die Kammertemperatur stabilisiert werden. Typisch für dieses System ist seine Trägheit, die zwar wie oben gezeigt, einerseits die kleinen Regelschwankungen nicht auf die Probe durchschlagen läßt, auf größere Änderungen des Sollwerts, z.B. beim Abkühlen von Raum- auf Versuchstemperatur, jedoch mit langen Einstellzeiten t_E reagiert. Da der Regler nach dem recht schnellen Erreichen der eingestellten Kammertemperatur nur noch die zur Aufrechterhaltung dieser Temperatur benötigte LN_2 -Menge durchläßt, wird die Kälteleistung dann stark reduziert und die Abkühlkurve der Spannköpfe, die wegen der großen Wärmekapazität ohnehin nicht so steil verläuft wie die der Kammertemperatur (s. Abb. 6a), flacht noch weiter ab (s. Abb. 6b).

Dieser Mangel ließe sich grundsätzlich beheben, indem die Fühler der Temperaturregler an den Spannköpfen bzw. der Stahlproben angebracht werden. Dadurch würden sich im Idealfall Abkühlkurven gemäß Abb. 6c) ergeben. Wegen der hohen Wärmekapazität von Spannköpfen bzw. Probe ergäbe sich dann jedoch ein System mit sehr langen Ansprechzeiten, was regelungstechnisch nur schwierig zu beherrschen ist. Als nachteilig käme hinzu, daß die maßgeblichen Materialkennwerte wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität selbst temperaturabhängig sind, so daß jede Änderung der Versuchsanordnung eine neue Optimierung der Reglereinstellung erfordern würde.

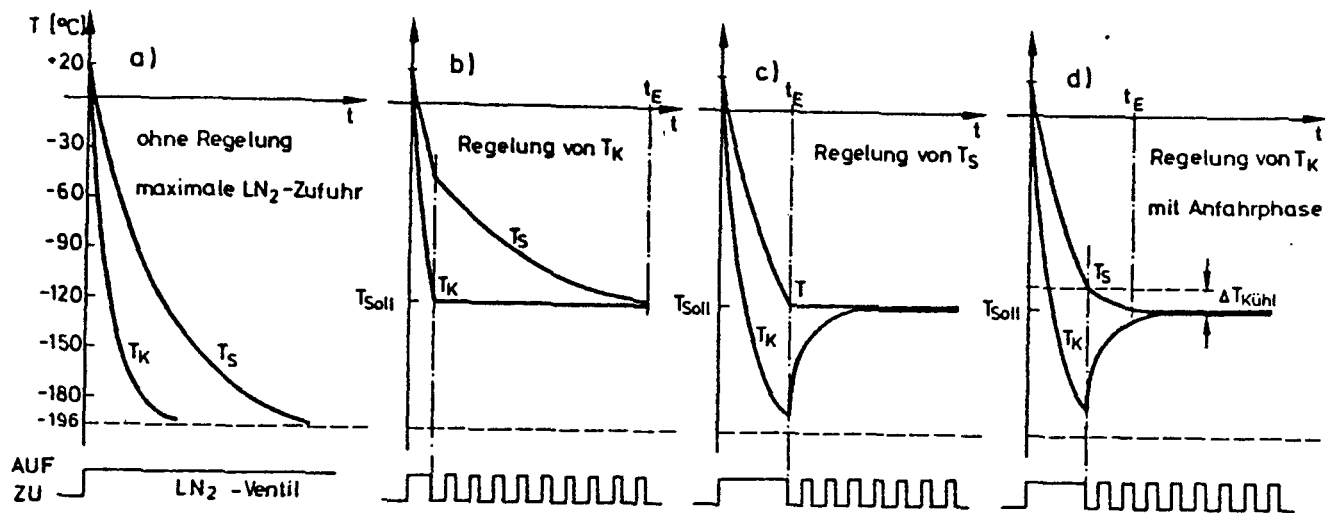


Abb. 6: Schematische Darstellung der Abkühlkurven verschiedener Reglersysteme

- a) ohne Regelung, maximale LN_2 -Zufuhr
- b) Regelung der Kammertemperatur T_K
- c) Regelung der Spannkopftemperatur T_S
- d) Regelung der Kammertemperatur mit Anfahrphase

Es wurde daher eine Schaltung entwickelt, die einen Kompromiß zwischen den beiden beschriebenen Methoden der Regelung darstellt und deren Vorzüge miteinander verbindet, indem sie sowohl eine optimale kurze Abkühlphase als auch unproblematisches Regelverhalten im Proportionalbereich bietet. Zusätzlich zu dem am Regler angeschlossenen Pt-100-Fühler, der die Kammertemperatur T_K erfaßt, wird mit einem FeKo-Thermoelement die Temperatur T_S des Spannkopfes bzw. der Stahlprobe gemessen und ebenso wie T_K digital angezeigt. Ein Differenzverstärker subtrahiert von T_S die gewählte Solltemperatur und setzt, solange die Differenz größer als ein zwischen 5 und 15 K einstellbarer Wert $\Delta T_{\text{Kühl}}$ ist, den Regler außer Funktion, indem das LN_2 -Ventil permanent offengehalten wird. Erst wenn sich Proben- bzw. Spannkopftemperatur soweit dem Sollwert genähert hat, daß diese Schwelle $\Delta T_{\text{Kühl}}$ unterschritten wird, übernimmt der Regler die exakte Temperatursteuerung und -stabilisierung. Die Umschaltung erfolgt mit einstellbarer Hysterese, so daß immer ein definierter Schaltzustand gewährleistet ist.

Den schematischen Verlauf der mit dieser Regelschaltung erzielten Abkühlkurven zeigt Bild 6d). Die Einstellzeit t_E ist wesentlich kürzer als in Bild 6b), außerdem kann durch geeignete Einstellung von $\Delta T_{\text{Kühl}}$ erreicht werden, daß die Spannkopf-temperatur T_s und die Kammertemperatur T_k etwa zur gleichen Zeit den eingestellten Sollwert erreichen, so daß danach keine Temperatúrausgleichsvorgänge mehr auftreten können.

Unterhalb des Sollwertes liegt eine zweite Schaltschwelle, deren Abstand ΔT_{Heiz} ebenfalls zwischen 5 und 15 K einstellbar ist und die, wiederum mit einer gewissen Hystere, die Heizschlange in der Kältekammer einschaltet, sobald die Spannkopf- bzw. Proben-temperatur T_s den momentanen Sollwert um mehr als ΔT_{Heiz} unterschreitet. In diesem Schaltzustand ist die LN_2 -Zufuhr blockiert, so daß die Kammer, z.B. zum Probenausbau, in kurzer Zeit auf Raumtemperatur gebracht werden kann.

Einige weitere Schaltungsdetails erleichtern die Bedienung des Regelsystems und erhöhen seine Betriebssicherheit. So verhindert eine Begrenzungsschaltung, daß die Kammertemperatur unter -180°C absinkt, was bei Betrieb mit der Zusatzregelung ($\Delta T_{\text{Kühl}}$) in der Anfahrphase trotz eines höher eingestellten Sollwertes möglich wäre. Dadurch wird die Überflutung der Kammer mit flüssigem Stickstoff infolge unvollständiger Verdampfung vermieden; der genannte Temperaturgrenzwert wurde empirisch ermittelt und kann bei Bedarf verändert werden.

Ein für alle drei Regler gemeinsamer Taktgenerator bewirkt in gewissen Umfange eine Synchronisierung der Schaltimpulse für die Magnetventile zur LN_2 -Einspritzung, wodurch die Geräuschbelastung durch das Ventilknacken erheblich vermindert wurde. Außerdem läßt sich durch Verändern der Taktfrequenz die Charakteristik der Regler beeinflussen, indem ihnen ein externer Schaltrythmus aufgeprägt wird (s. Abb. 7, 8).

Da die verwendeten Magnetventile dazu neigen, während längerer, ununterbrochener Kühlphasen infolge eingedrungener Feuchtigkeit

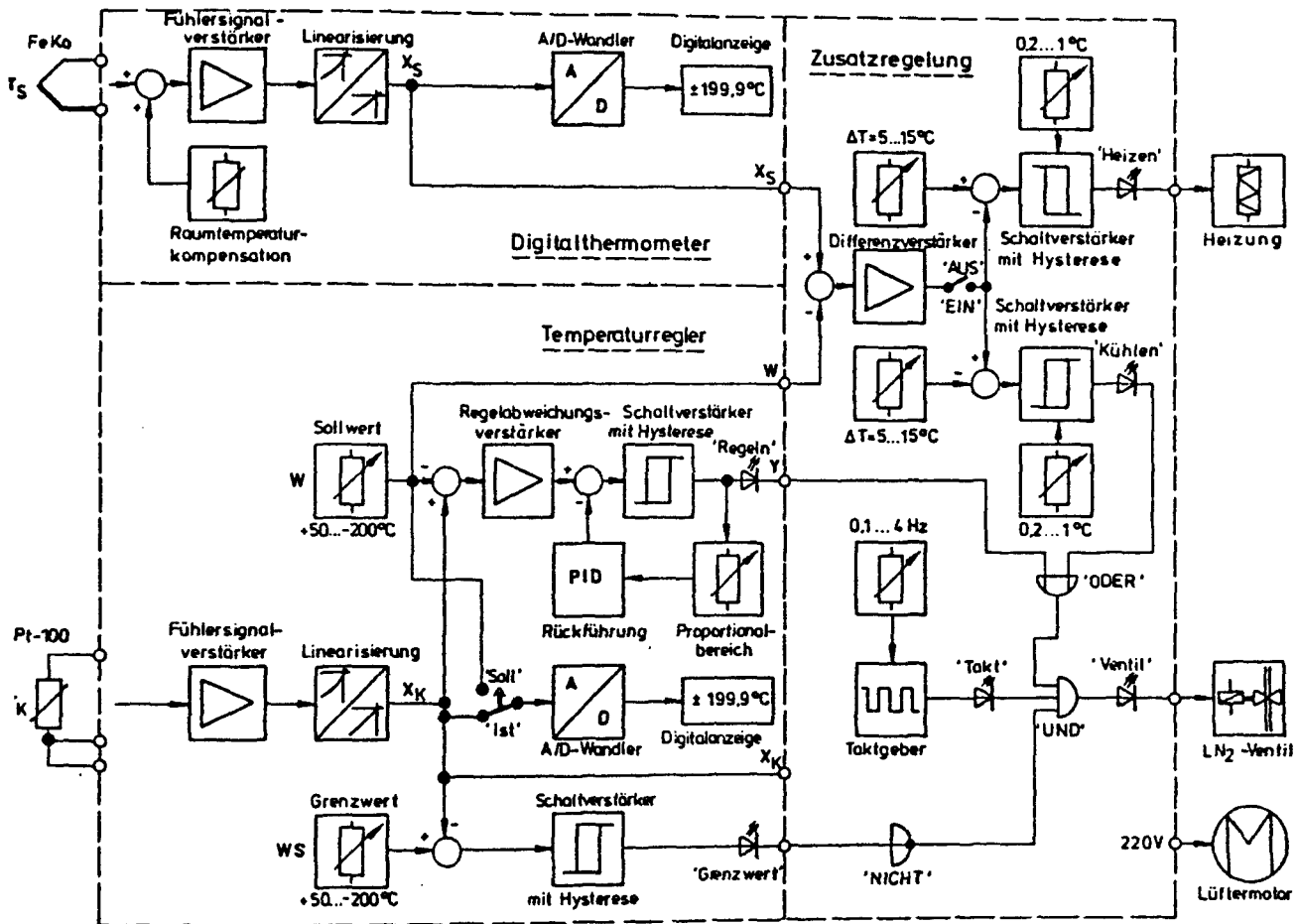


Abb. 7: Blockschaltbild eines Kanals des Temperaturreglers

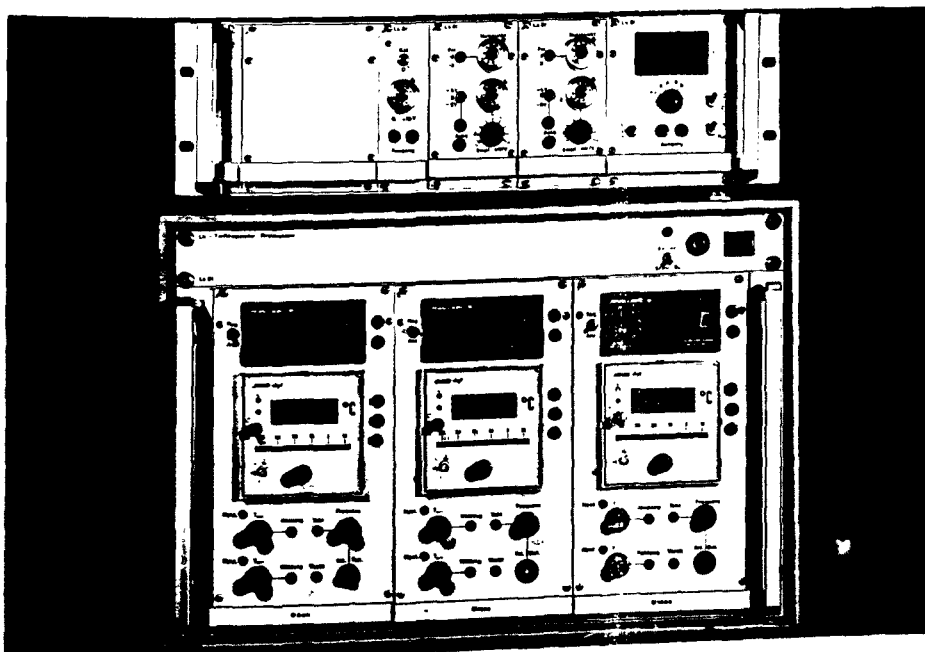


Abb. 8: Temperaturregeleinheit und Dehnungsmeßverstärker

festzufrieren, werden sie unabhängig vom Reglerausgangssignal periodisch für kurze Zeit automatisch ausgeschaltet. Diese zwangsweise Unterbrechung der LN_2 -Zufuhr erfolgt jedoch nur, wenn der Regler mindestens zehn Taktimpulse lang kontinuierlich "Ein" signalisiert hat, so daß der normale Regelbetrieb im Proportionalbereich nicht beeinträchtigt wird. Durch diese regelmäßige Betätigung wird das Blockieren der Ventile verhindert.

Sämtliche Kabelverbindungen sind sowohl an der Kältekammer als auch an der Reglereinheit steckbar ausgeführt. Dabei werden für die Thermoelementleitungen Spezialstecker mit Polen aus Eisen bzw. Konstantan benutzt, die auch bei den unvermeidlichen Temperaturschwankungen in der Umgebung der Kältekammer keine Meßwertverfälschung verursachen.

Die LN_2 -Versorgung erfolgt aus einem 200 l-Tank mit selbsttätigem Druckaufbau, an den über ein Verteilerstück alle drei Kammerabschnitte parallel angeschlossen sind. Eine Tankfüllung reicht für 4 - 5maliges Abkühlen der genannten Apparatur auf -170°C , wobei für den Abkühlvorgang selbst ca. 30 min und für die Vorbereitung und Durchführung des Zugversuches im günstigsten Fall ca. 15 min zu veranschlagen sind. Auch das Aufwärmen von -170°C auf Raumtemperatur dauert wegen der hohen Wärmekapazität der Spannköpfe ca. 30 min.

3.1.2. Lastaufbringung

Wie bereits erläutert, kann bei tiefer Temperatur der zu prüfende Stahlabschnitt nicht direkt in die Klemmbacken der Prüfmaschine eingespannt werden. Der Verankerungsbereich muß daher in die Kältekammer hineinverlegt werden, um eine homogene Temperaturverteilung über die gesamte Probenlänge zu gewährleisten. Dazu dienen die bereits mehrfach erwähnten zylindrischen Spannköpfe aus kaltzähem Stahl von 110 mm Durchmesser und 230 mm Höhe, in deren Aussparung die Zugprobe mittels Hülzen und Klemmkeilen eingehängt werden kann (s. Abb. 9).

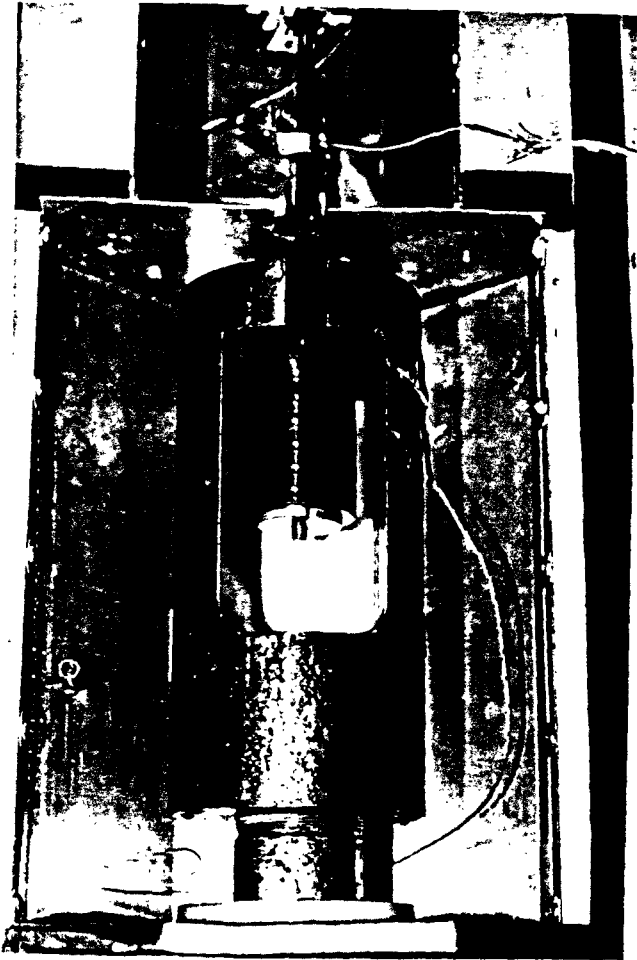


Abb. 9:

Spannkopf mit eingehängter
Stahlprobe

Die Spannköpfe werden über Stahlwellen von 55 mm Durchmesser, die durch entsprechende Bohrungen in der Kammerwandung geführt werden, von den Klemmbanken der Prüfmaschine gehalten. Die verwendeten Keile und Hülzen besitzen gegenüber den bei Raumtemperatur verwendeten Ausführungen eine größere Länge und geringere Steigung, um die Beanspruchung der Probe im Einspannbereich möglichst gering zu halten. Infolge der temperaturbedingten Festigkeitserhöhung und Verformbarkeitsabnahme beim Abkühlen des Probenmaterials kann sich die Zahnung der Klemmkeile nicht so gut in die Probenoberfläche eindrücken wie bei Raumtemperaturversuchen. Es kommt daher beim Hochfahren der Last oft zu Rutschvorgängen zwischen Probe und Keilen oder auch zwischen Keilen und Hülse. Dieser unerwünschte Effekt läßt sich weitgehend vermeiden, wenn die Probe vor dem Abkühlen einmal vorbelastet wird, wobei das Ende des elastischen Bereichs des Probenmaterials keinesfalls erreicht werden darf.

Noch wichtiger ist dieses Vorspannen im Raumtemperaturbereich bei der Prüfung von Litzen, wo sich nicht nur die Klemmkeile an die Außendrähte, sondern auch die Außendrähte untereinander und vor allem an den Seelendraht andrücken müssen, der ja von der Einspannung selbst nicht direkt gehalten werden kann. Jegliches Rutschen während des Versuchsablaufs verursacht ein kurzzeitiges Absinken der Last und damit einen Peak im Spannungs-Dehnungs-Diagramm; schlimmstenfalls kann sogar durch die ruckartige Belastung das am Stahl angeklemmte Dehnungsmeßsystem selbst rutschen, was sich in einem Versatz der aufgetragenen Kurve äußern würde. Die Auswertung solcher Diagramme würde durch die notwendige grafische Korrektur wesentlich erschwert.

3.1.3. Ermittlung der lastabhängigen Dehnung

Zur Dehnungsmessung bei der Zugprüfung von Stahlproben werden grundsätzlich induktive Wegaufnehmer verwendet, da diese den Vorteil großer Flexibilität bezüglich Meßbasis und Meßbereich bieten. Sie lassen sich mit Hilfe von Klemmhalterungen problemlos an unterschiedlichen Prüflingen anbringen und arbeiten von ihrer prinzipiellen Funktionsweise her temperaturunabhängig. Für die beiden hier beschriebenen Tieftemperaturprüfvorrichtungen wurden insgesamt drei verschiedene Dehnungsmeßsysteme entwickelt, die sich in ihrem mechanischen Aufbau zum Teil wesentlich unterscheiden. Bei der zuerst beschriebenen, einfachen Apparatur für Versuche bei LN_2 -Siedetemperatur von -196°C ist die Probe nur durch einen Styropormantel isoliert. Es bietet sich daher an, mittels eines durch die Isolierung nach außen führenden Meßgestänges die Dehnung in den Raumtemperaturbereich zu übertragen, wo sie sich völlig problemlos mit einem handelsüblichen induktiven Wegtaster erfassen läßt. Die Befestigung des Gestänges an der Probe erfolgt über zwei Halbschalen aus Stahl, die an einem Ende mit einer Schneide, am anderen über einen O-Ring an der Probe anliegen und von Schlauchschellen zusammengehalten werden (s. Abb. 10). Durch Bohrungen an den äußeren Enden der Querstangen verläuft parallel zur Probe ein Stahlrohr, welches, um Längenänderungen durch Temperaturschwankungen zu vermeiden, von temperiertem

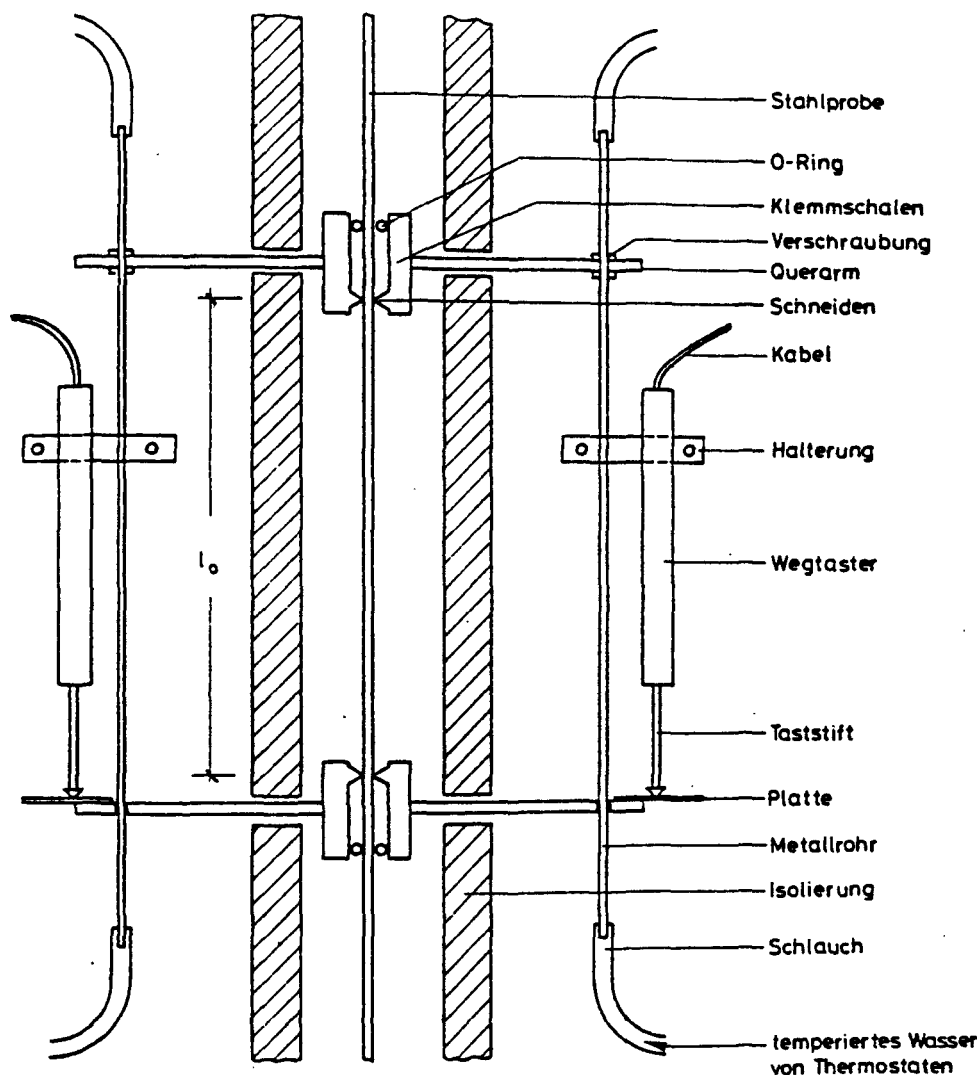


Abb. 10:

Dehnungsmeßsystem
aus Abb. 1

Wasser durchströmt wird und mit einer der Querstangen verschraubt ist. Dieses Rohr trägt den Wegaufnehmer, dessen Taststift auf der anderen Querstange aufliegt und der so die Längenänderung des zwischen den Schneiden liegenden Probenabschnitts erfaßt.

Um Meßfehler infolge einer Krümmung der Stahlprobe auszuschließen, wird die Verformung an zwei genau gegenüber liegenden Stellen gemessen und gemittelt. Die Durchführungsöffnungen im Isoliermantel werden mit lockerer Watte verschlossen, so daß sich zwar die Querstangen ungehindert bewegen können, ein zu starkes Ausströmen von kaltem N_2 -Gas jedoch unterbunden wird. Damit ist gewährleistet, daß die unmittelbar vor den Durchführungsöffnungen angebrachten Wegtaster keinen die Meßgenauigkeit beeinträchtigenden Temperaturschwankungen ausgesetzt sind.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Meßsystems liegt in seiner großen Masse, die zum einen den Prüfling zusätzlich belastet, zum anderen sich wegen der damit verbundenen Trägheit den beim Versagen der Probe auftretenden Beschleunigungskräften widersetzt und leicht zu Beschädigungen des Systems führen kann. Hierbei spielen besonders auch die langen Hebelarme eine Rolle, die in horizontaler Richtung zur Überbrückung der Isolierschicht notwendig sind. Grundsätzlich bietet diese Meßanordnung aber die Möglichkeit, mit vergleichsweise geringem Aufwand Einzeluntersuchungen bei tiefen Temperaturen durchzuführen.

Für den Einsatz in der bereits beschriebenen, dreiteiligen Kältekammer wurde daher ein neues Dehnungsmeßsystem entwickelt, das diese Nachteile nicht aufweist. Die Wegtaster sind nicht direkt am Prüfling befestigt, sondern sitzen auf einem parallel dazu an der Kammerinnenwand angebrachten Quarzglasstab. An der Stahlprobe sind lediglich zwei relativ leichte Aluminiumblöcke angeklemt, die als Anschlagfläche für die Taststifte dienen und über je zwei gegenüberliegende Stahlschneiden und zwei Rollen Kontakt mit der Probe haben. Durch den Abstand der beiden Schneidenpaare ist die Meßbasis exakt definiert (s. Abb. 11, 12).

Da der die Wegaufnehmer tragende Quarzstab um seine Längsachse drehbar montiert ist, kann die gesamte Meßvorrichtung vor dem Bruch der Zugprobe von dieser weggeschwenkt werden und zwar auch bei geschlossener Kammer durch einen von außen betätigten Seilzug. Eine Beschädigung des Meßsystems beim Bruch der Probe ist wegen des nicht mehr vorhandenen mechanischen Kontaktes dann ausgeschlossen.

Der Einsatz von induktiven Wegtastern bei tiefen Temperaturen ist, wie bereits in Kap. 2.2 dargestellt, nicht unproblematisch. Der hier verwendete Aufnehmertyp funktioniert nur dann zufriedenstellend, wenn besondere Maßnahmen ergriffen wurden, um Feuchtigkeit aus der Taststiftführung fernzuhalten, andernfalls erfolgt beim Abkühlen ein mechanisches Blockieren

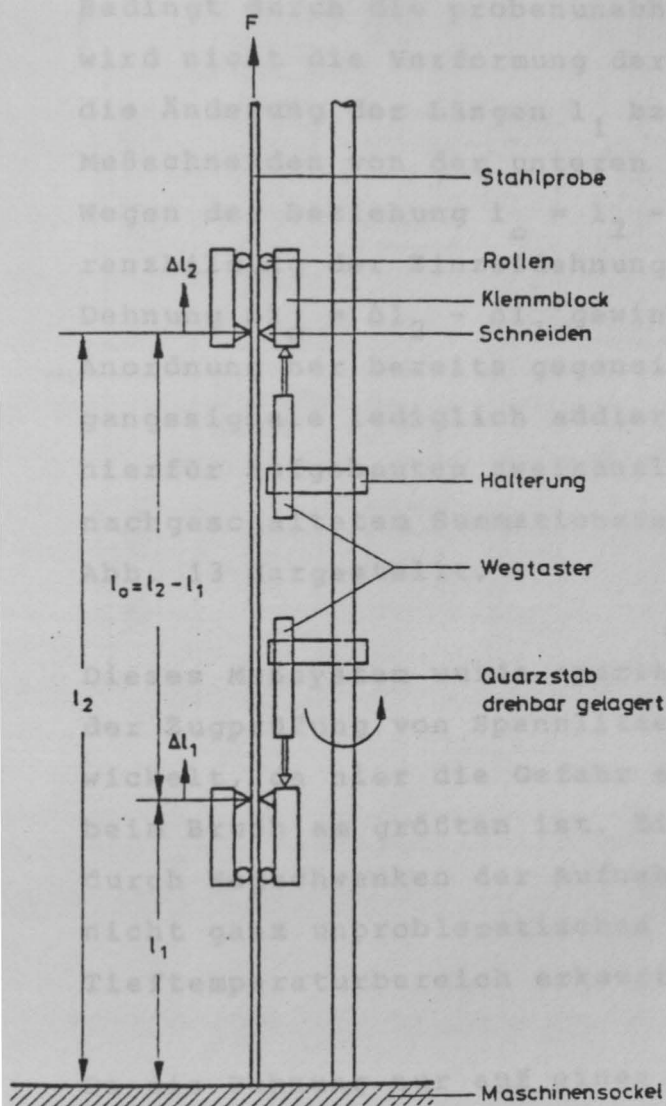


Abb. 11: Prinzipskizze des schwenkbaren Meßsystems

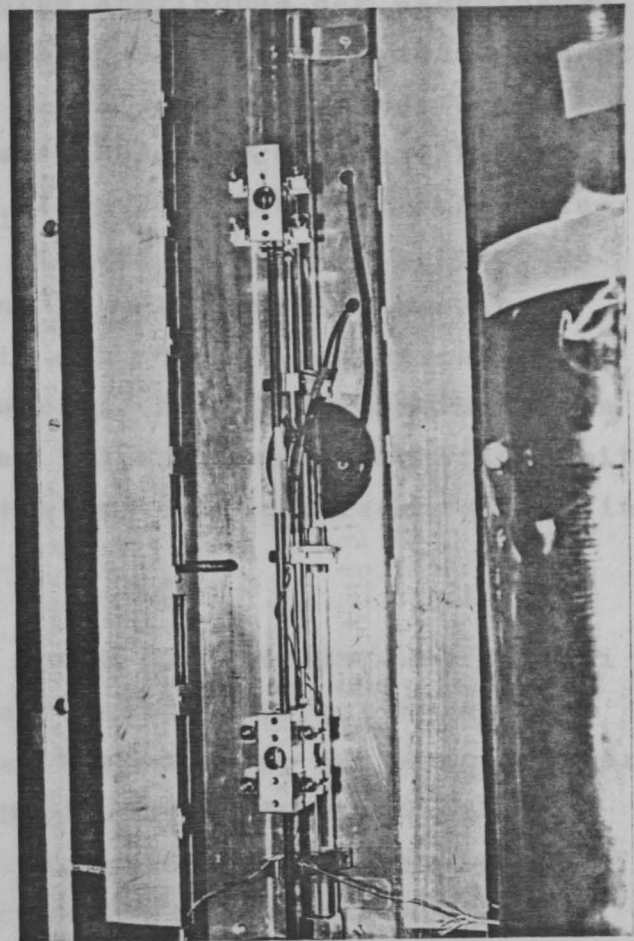


Abb. 12: Schwenkbares Meßsystem mit Probe in der Kältekammer eingebaut

des Aufnehmers durch Eisbildung. Den Feuchteschutz übernimmt im Normalbetrieb ein abdichtender Faltenbalg aus Gummi, der jedoch mit sinkender Temperatur seine Flexibilität verliert und daher entfernt werden muß, um die Bewegung des Taststifts nicht zu behindern. Die Feuchtigkeit, die sich nach Beendigung jedes Tieftemperaturversuches unvermeidlicherweise an und in den noch kalten Wegtastern niederschlägt, muß daher vor jedem neuen Versuch durch mindestens ein- bis zweistündige Lagerung in einem Trockenschrank bei $60...70^{\circ}\text{C}$ ausgetrieben werden. Kann diese Mindestzeit nicht eingehalten werden, so empfiehlt sich die wechselweise Verwendung von zwei Aufnehmerpaaren, die bei jeder Messung ausgetauscht werden.

Bedingt durch die probenunabhängige Anbringung der Wegaufnehmer wird nicht die Verformung der Meßbasis l_0 direkt erfaßt, sondern die Änderung der Längen l_1 bzw. l_2 , also der Abstände der Meßschneiden von der unteren feststehenden Probenverankerung. Wegen der Beziehung $l_0 = l_2 - l_1$ läßt sich jedoch durch Differenzbildung der Einzeldehnungen die auf die Meßbasis bezogene Dehnung $\Delta l_0 = \Delta l_2 - \Delta l_1$ gewinnen. Da die Aufnehmer von ihrer Anordnung her bereits gegensinnig arbeiten, brauchen ihre Ausgangssignale lediglich addiert werden. Das Blockschaltbild des hierfür aufgebauten zweikanaligen Trägerfrequenzverstärkers mit nachgeschaltetem Summationsverstärker und Digitalanzeige ist in Abb. 13 dargestellt.

Dieses Meßsystem wurde speziell unter Berücksichtigung der bei der Zugprüfung von Spannlitzen auftretenden Belastungen entwickelt, da hier die Gefahr einer Beschädigung der Wegaufnehmer beim Bruch am größten ist. Die Möglichkeit, dieses Risiko durch Wegschwenken der Aufnehmer zu reduzieren, wurde mit der nicht ganz unproblematischen Handhabung der Wegtaster im Tieftemperaturbereich erkauft.

Da die Dehnung nur auf einer Seite der Stahlprobe gemessen wird, können, falls diese eine nicht zu vernachlässigende Krümmung aufweist, prinzipiell die Meßwerte verfälscht werden. Um solche Fehler zu vermeiden, müßte ein zweites Wegtasterpaar auf der anderen Seite der Probe angebracht werden. Erfahrungsgemäß sind jedoch die durch die Probenkrümmung entstehenden Meßfehler wegen des geringen Versatzes zwischen Probenachse und Meßsystem i.A. so gering, daß der Aufwand des Einsatzes von vier Wegaufnehmern nicht gerechtfertigt scheint. Da bei der Prüfung von einzelnen Spannstählen die Beschädigungsgefahr für das Meßsystem ohnehin wesentlich geringer ist, wurde hierfür eine Ausführung entwickelt, die fest mit der Probe verbunden ist, so daß statt der anfälligen Wegtaster induktive Wegaufnehmer mit separaten Tauchanker verwendet werden können (s. Abb. 14, 15). Damit entfällt zwar die Möglichkeit, das Meßsystem während des Versuches von der Probe zu entfernen; andererseits besteht kaum die Gefahr, daß der Aufnehmer durch Eisbildung blockiert wird, da sich der Tauchanker berührungslos im Kernkanal des Spulengehäuses bewegt und keine eng tolerierte mechanische Führung benötigt.

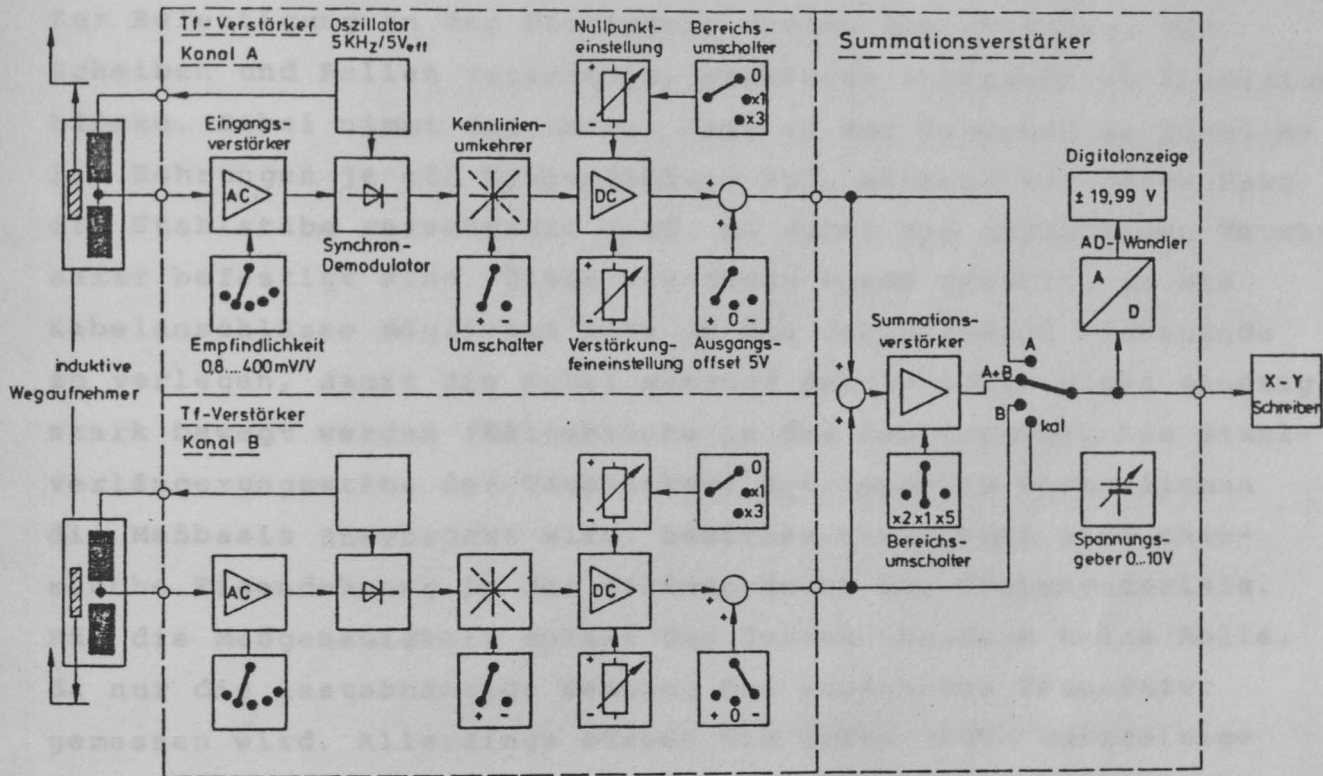


Abb. 13: Blockschaltbild des Dehnungsmeßverstärkers

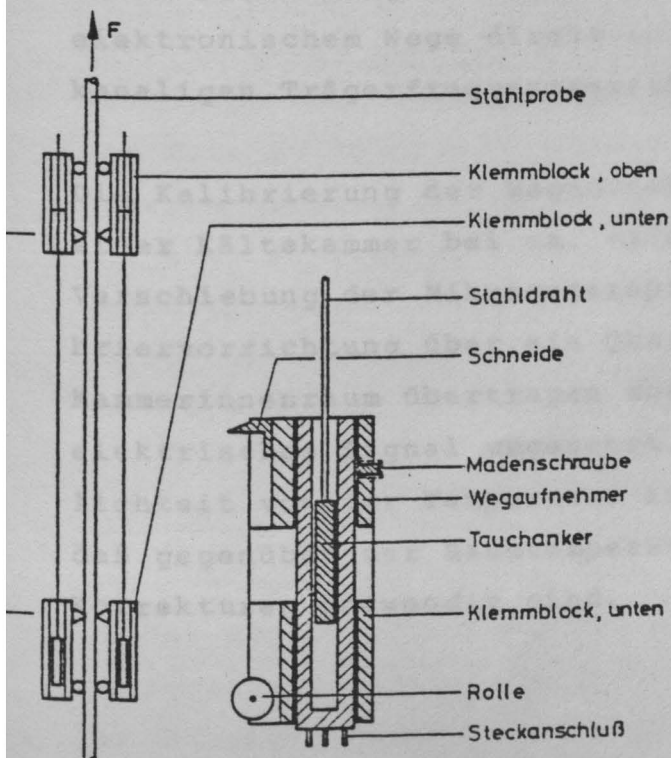


Abb. 14: Prinzipskizze des Meßsystems mit separaten Tauchankern

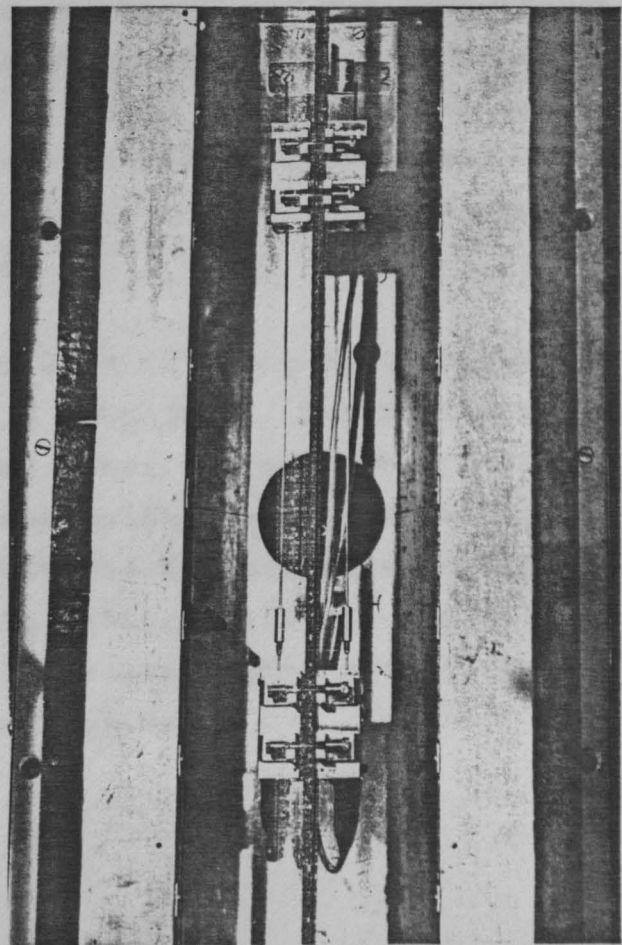


Abb. 15: Meßsystem mit separaten Tauchankern mit Probe in Kammer eingebaut

Zur Befestigung an der Stahlprobe dienen die gleichen, mit Scheiben und Rollen versehenen, paarweise anklemmbaren Aluminiumblöcke. Dabei nimmt das untere Paar in zur Probenachse parallelen Bohrungen je ein Spulengehäuse auf, während im oberen Paar die Stahlstäbe verschraubt sind, an denen die zugehörigen Tauchanker befestigt sind. Diese Anordnung wurde gewählt, um die Kabelanschlüsse möglichst nahe an das feststehende Probenende zu verlegen, damit die Kabel während des Versuchs nicht unnötig stark bewegt werden (Kältebrüche in der Isolierung). Die Stahlverlängerungsstäbe der Tauchanker, mit denen im wesentlichen die Meßbasis überbrückt wird, besitzen naturgemäß eine thermische Eigendehnung in der Größenordnung des Probenmaterials. Für die Meßgenauigkeit spielt das jedoch insofern keine Rolle, da nur die lastabhängige Dehnung bei konstanter Temperatur gemessen wird. Allerdings müssen die Stäbe gegen kurzzeitige Temperaturschwankungen im Rythmus der LN_2 -Zufuhr abgeschirmt werden, was jedoch mit geringem Aufwand durch übergeschobene Elektro-Isolierschläuche zu bewerkstelligen ist.

Durch die Verwendung von zwei Wegaufnehmern auf gegenüberliegenden Seiten der Probe sind durch Mittelwertbildung der beiden Ausgangssignale auch bei stark gekrümmten Prüflingen fehlerfreie Meßwerte gewährleistet. Diese Mittelung erfolgt auf elektronischem Wege direkt in dem bereits beschriebenen zweikanaligen Trägerfrequenzverstärker.

Die Kalibrierung der Wegaufnehmer wird in jedem Fall innerhalb einer Kältekammer bei ca. -170°C durchgeführt. Dabei wird die Verschiebung der Mikrometerspindel einer herkömmlichen Kalibriervorrichtung über ein Quarzglasgestänge von außen in den Kammerinnenraum übertragen und dort vom Wegaufnehmer in ein elektrisches Signal umgesetzt. Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Temperatur ist allerdings recht gering, so daß gegenüber der Raumtemperaturkalibrierung nur leichte Korrekturen notwendig sind.

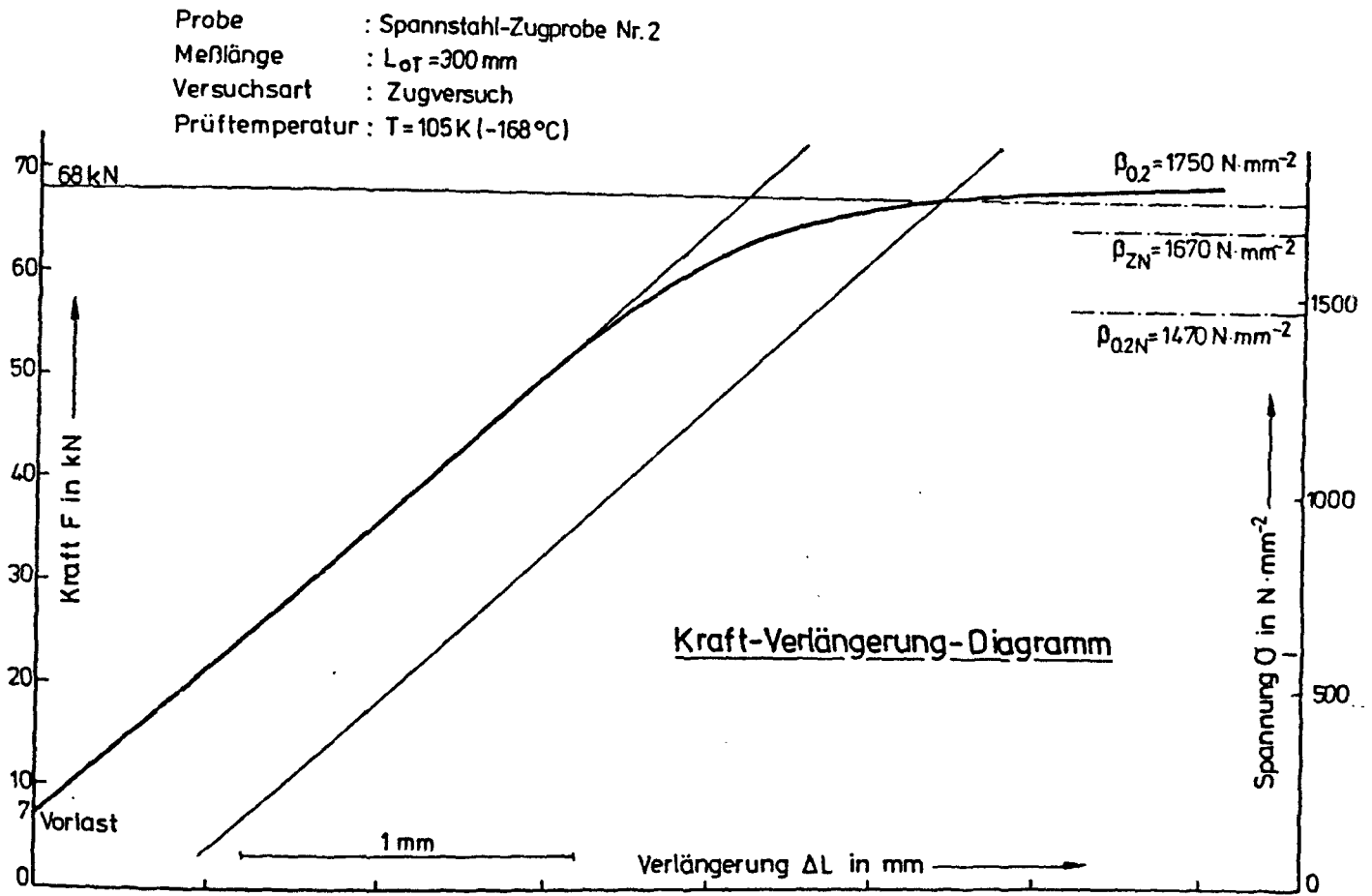


Abb. 16: Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Spannstahls von 7,0 mm \varnothing

Abb. 16 zeigt das mit dem Meßsystem aus Abb. 12 aufgenommene Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines kaltgezogenen Spannstahls der Güte St 1470/1670 mit 7,0 mm \varnothing , das bereits während der Erprobungsphase der Kältekammer ermittelt wurde. Das Meßsystem aus Abb. 15 liefert identische Ergebnisse. Zu den erfolgreich geprüften Materialien gehören außerdem kaltgezogene sowie vergrößerte Spannstähle von 12,2 mm \varnothing und 7-drähtige Spanndrahtlitzen von 12,9 mm und 15,3 mm \varnothing .

3.2. Untersuchung lastabhängiger Verformungen an Beton bei tiefen Temperaturen

Um bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Beton zu repräsentativen, von der zufälligen Verteilung des Zuschlags unabhängigen Ergebnissen zu gelangen, sollten die Proben-

dimensionen mindestens das Fünffache des größten Korndurchmessers betragen. Für Druckversuche sollten die Probekörper außerdem ein Höhen-Seitenverhältnis von mindestens zwei aufweisen, um die Einflüsse der belasteten Stirnflächen, die durch den Kontakt mit den Druckstempeln in ihrer Querdehnung behindert sind, möglichst klein zu halten. Ausgehend von einem Größtkorn von 16 mm ergibt sich aus diesen Bedingungen ein zylindrischer Körper von 80 mm Durchmesser und 160 mm Höhe, wobei die rotationssymmetrische Form auch einer gleichmäßigen Temperaturverteilung innerhalb der Probe zugute kommt.

Die nachstehend beschriebene Tieftemperaturprüfvorrichtung zur Ermittlung der Druckfestigkeit von Beton wurde in erster Linie für die o.g. Probendimensionen konzipiert, gestattet jedoch auch die Prüfung anderer Probekörper wie z.B. Würfel mit 150 mm Kantenlänge.

3.2.1. Erzeugung und Regelung der Versuchstemperatur

Zur Temperierung der Proben wird eine handelsübliche, LN_2 -betriebene Kältekammer verwendet, deren Funktionsweise bereits in 2.1 und 3.1.1. ausführlich beschrieben wurde. Der Innenraum besitzt die Abmessungen 300 x 350 x 450 mm und ist durch eine Tür an der Vorderseite sowie je eine Bohrung von 100 mm Durchmesser in Boden und Deckel zugänglich, welche zur Durchführung der Druckstempel dienen (s. Abb. 17).

Das Abkühlen des Probenmaterials kann direkt in dieser Kammer, die in einer Universalprüfmaschine installiert ist, erfolgen; speziell bei Proben, die vor dem Druckversuch einer zyklischen Temperaturbelastung unterworfen werden, empfiehlt es sich aus Gründen der Zeitersparnis, hierfür eine zweite, separate Kältekammer zu verwenden und die kalten Proben unmittelbar vor der Lastaufbringung in die eigentliche Prüfkammer einzusetzen.

Die Regelung der Kammertemperatur übernimmt ein PID-Zweipunktregler, der von einem Pt 100-Fühler in der Kammer das Istwertsignal bekommt und das Magnetventil für die LN_2 -Einspritzung

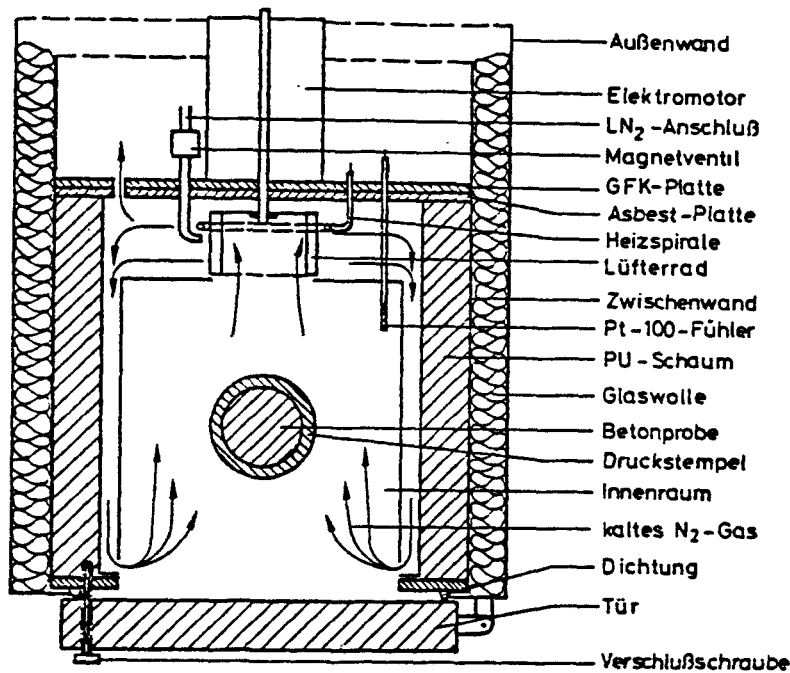


Abb. 17

Horizontaler Querschnitt
einer handelsüblichen
LN₂-Kältekammer

betätigt. Der Regler kann zwecks Realisierung definierter Temperaturverläufe mit einem Programmgeber gekoppelt werden. Zur Kontrolle des sich im Probekörper ausbildenden Temperaturgradienten ist es sinnvoll, sowohl die Oberflächen- als auch die Kerntemperatur der Betonprobe mittels Thermoelement zu messen; dadurch kann zum einen der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem sich eine über das Volumen gleichmäßige Probentemperatur eingestellt hat, zum anderen lassen sich ungewollte Schädigungen des Probenmaterials durch mechanische Spannung vermeiden.

3.2.2. Lastaufbringung

Die für die Druckfestigkeitsprüfung erforderliche Last wird von einer üblichen Universalprüfmaschine erzeugt, zwischen deren Druckstempeln die Kältekammer eingebaut ist. Zur Übertragung der Last auf den Probekörper dienen zwei Stahlwellen von 100 mm Durchmesser, die als Verlängerung der maschineneigenen Druckstempel durch die entsprechenden Bohrungen in die Kammer hineinragen. Die obere Welle enthält ein als Kugelkalotte ausgebildetes Zwischenstück, damit auch bei nicht exakt parallelen Stirnflächen die Probe vollflächig belastet wird. Zur Prüfung würfelförmiger Probekörper werden zusätzliche Stahlplatten in der Größe der Würfelflächen zwischen Probe und Druckstempel gelegt.

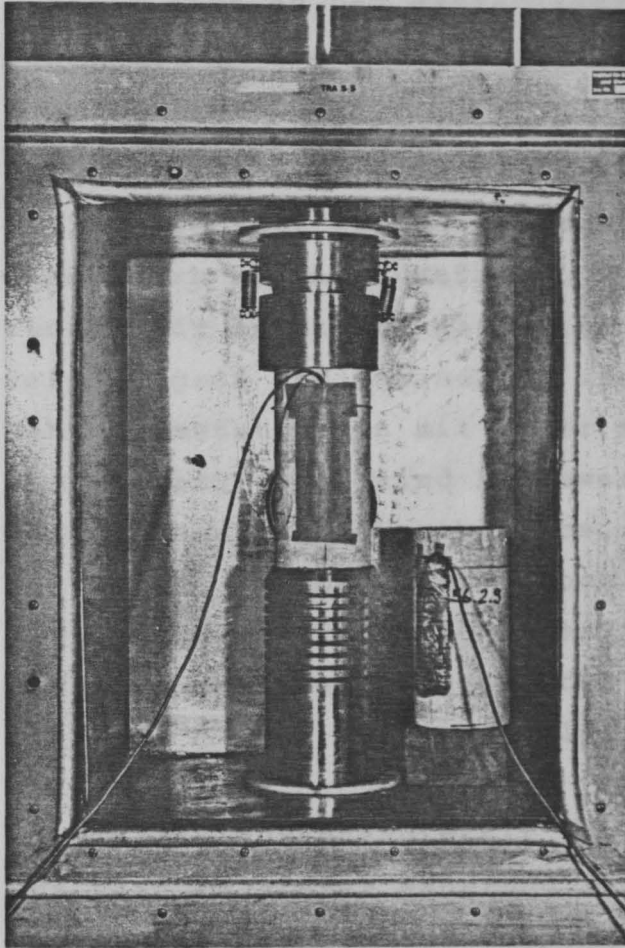


Abb. 18

Druckprüfmaschine mit
eingesetzter Kältekammer
und Betonprobe

Die Druckstempel sind an den kammerseitigen Enden mit umlaufenden Nuten versehen, um die Oberfläche und somit den thermischen Kontakt zum kalten N_2 -Gas zu vergrößern. Dadurch wird trotz des hohen Wärmestroms von den warmen zu den gekühlten Enden der Wellen ein nur unwesentlich über der Kammertemperatur liegender Temperaturwert an den probenseitigen Stirnflächen der Stempel erreicht. Zusätzlich werden zur Isolierung dünne Pappscheiben zwischen Probekörper und Druckstempel gelegt, um Veränderungen der Probentemperatur weitgehend auszuschließen.

Die Prüfmaschine sollte bei Druckfestigkeitsprüfungen von Beton grundsätzlich nicht last-, sondern weggesteuert betrieben werden, um das sofortige Nachfahren der Druckstempel beim Versagen der Probe zu vermeiden und auch den abfallenden Teil der σ - ϵ -Kennlinie noch aufzeichnen zu können. Das zur Aufnahme des Spannungs-Dehnungs-Diagramms benötigte Lastsignal

liefert eine an den Hydraulikkreislauf der Prüfmaschine angeschlossene Kraftmeßdose.

3.2.3. Ermittlung der lastabhängigen Dehnung

Da im Gegensatz zur Dehnungsmessung an Stählen bei Betonproben wesentlich kleinere Meßbasen üblich sind und zudem Klemmhalterungen für induktive Wegaufnehmer wegen der Probendimensionen relativ groß und unhandlich ausfallen würden, kommen hier Dehnungsmeßstreifen mit einer aktiven Gitterlänge von 60 mm zum Einsatz. Zwar sind Klebeverbindungen im Tieftemperaturbereich nicht ganz problemlos, wegen der rauhen Oberfläche des Betons ergeben sich jedoch bei Verwendung eines geeigneten Klebers keine Schwierigkeiten. Kontrollmessungen mit induktiven Wegaufnehmern bestätigten, daß der Verbund DMS - Probe auch bei -170°C noch voll gewährleistet ist.

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands der DMS kann in erster Näherung vernachlässigt werden, da die Messung bei konstanter Temperatur durchgeführt wird. Da jedoch leichte Temperaturschwankungen nicht ganz zu vermeiden sind, werden zur Kompensation weitere DMS, die auf einem zweiten, unbelasteten Probekörper appliziert sind, verwendet. Da diese Probe sich zusammen mit dem zu prüfenden Exemplar in der Kältekammer befindet, sind gleiche Temperaturverhältnisse für alle DMS sichergestellt. Im Normalfall braucht die geringfügige Temperaturabhängigkeit des K-Faktors nicht berücksichtigt zu werden.

Abb. 19 zeigt unter den hier beschriebenen Bedingungen ermittelte Spannungs-Dehnungs-Kennlinien eines wassersatten PZ-Betons bei verschiedenen Temperaturen. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg des E-Moduls sowie die Tendenz zu linear-elastischem Verhalten mit sinkender Prüftemperatur.

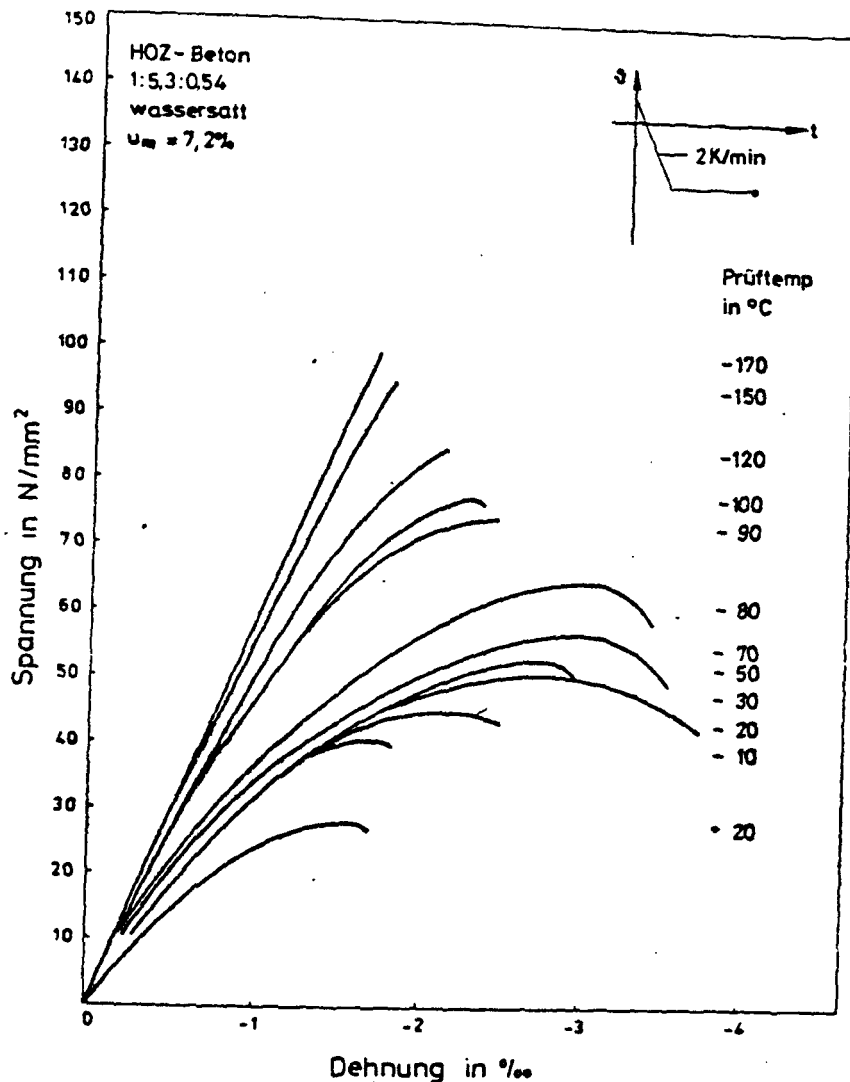


Abb. 19: Spannungs-Dehnungs-Kennlinien eines wassersatten HOZ-Betons bei verschiedenen Temperaturen

3.3. Untersuchung temperaturabhängiger Verformungen an Stahl und Beton

Für die Messung der thermischen Eigendehnung im Hoch- und Tieftemperaturbereich stehen seit längerem industriell gefertigte Dilatometer zur Verfügung, welche die Erzeugung von Temperaturen bis herunter zum Stickstoffsiedepunkt gestatten und somit prinzipiell für die hier anstehenden Messungen geeignet sind. Die maximale Probengröße von 40 mm x 12 mm Ø reicht jedoch bei einem derart inhomogenen Material wie Beton nicht aus, um repräsentative Dehnungswerte zu erhalten, da eine statistische Verteilung des Zuschlags bei diesen Probengrößen auch nicht annähernd gegeben ist. Es ist also die Untersuchung mehrerer Proben des gleichen Materials notwendig, wobei erfahrungsgemäß erst der Mittelwert aus mindestens zehn Messungen als repräsentativ für den entsprechenden Beton gelten kann.

Da dieses Meßverfahren sehr arbeitsaufwendig ist, wurde unter Zugrundelegung der in 3.2. überschlägig ermittelten Probengröße von 160 mm x 80 mm \emptyset ein neues Dilatometer entwickelt und aufgebaut. Es wurde so konzipiert, daß außer den genannten Zylinderproben auch Betonwürfel von 150 mm Kantenlänge sowie Stahlabschnitte von 160...170 mm Länge eingesetzt werden können.

3.3.1. Realisierung des Temperaturverlaufs

Zur Erzeugung der tiefen Temperaturen wird auch hier eine handelsübliche, LN_2 -betriebene Kältekammer vom gleichen Typ wie in 3.2.1. beschrieben, eingesetzt. Die Innenmaße betragen etwa 300 x 300 x 300 mm. Eine Bohrung von 80 mm Durchmesser in der oberen Wandung ermöglicht die Durchführung der Dehnungsmeßvorrichtung nach außen.

Falls die Temperatur-Dehnungs-Kennlinie punktweise aufgenommen werden soll, kann ein normaler PID-Zweipunktregler mit Pt-100-Fühler verwendet werden, dessen Sollwert von Hand in den gewünschten Stufen verstellt wird. Diese Methode ist zwar arbeitsaufwendig, bietet jedoch den Vorteil, daß in jeder Stufe ein völliger Temperatúrausgleich innerhalb der Probe abgewartet werden kann, so daß der gemessene Dehnungswert nicht durch Temperaturgradienten innerhalb des Probekörpers verfälscht wird. Zur selbsttätigen, kontinuierlichen Aufzeichnung des ϵ -t-Diagramms steht ein programmierbarer Temperaturregler zur Verfügung, der die Realisierung einmaliger oder zyklischer zeitabhängiger Temperaturverläufe gestattet. Anfangs- und Endtemperatur, Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeit sowie je eine Haltezeit bei der niedrigsten und der höchsten Temperatur sind digital in weiten Bereichen einstellbar.

Wegen der endlichen Wärmeleitfähigkeit des Betons ist bei kontinuierlicher Abkühlung ein Temperaturgradient vom Inneren der Probe zu ihrer Oberfläche unvermeidlich; dieser bestimmt die maximal zulässige Abkühlgeschwindigkeit und sollte daher, zumindest an einigen repräsentativen Probekörpern, für verschiedene Abkühlraten gemessen werden. Für die zylindrischen Proben der Größe 160 mm x 80 mm \emptyset stellt eine Abkühlgeschwin-

digkeit von 1....2 K/min i.A. einen geeigneten Kompromiß zwischen hinreichend homogener Durchkühlung und akzeptabler Versuchsdauer dar.

Das Signal für die Temperaturachse des ϵ -t-Diagramms stammt nicht von dem in der Kältekammer installierten Temperaturfühler, sondern von einem an der Probe angebrachten Thermo-
element; es wird in einem Digitalthermometer linearisiert und angezeigt. Durch die direkte Erfassung der Proben-
temperatur kann sich auch bei schnellerer Abkühlung der Temperaturversatz zwischen Kältekammer und Probekörper nicht im Diagramm aus-
wirken.

3.3.2. Ermittlung der temperaturabhängigen Dehnung

Bei der Messung temperaturabhängiger Längenänderungen besteht das grundsätzliche Problem in der Tatsache, daß jede Temperatur-
änderung nicht nur im Probekörper, sondern auch im Meßsystem eine thermische Eigendehnung verursacht, wodurch Meßfehler entstehen, die größer sein können als die Probendehnung selbst. Zwar ist es möglich, das Eigendehnverhalten des Meßsystems experimentell zu bestimmen und damit eine Korrektur der ver-
fälschten Meßwerte durchzuführen; dennoch sollten bei der Konstruktion Materialien mit möglichst kleinen thermischen Dehnungskoeffizienten verwendet werden, und diese Korrektur nicht größer als unbedingt nötig ausfallen zu lassen.

Ein Material mit in dieser Hinsicht sehr günstigem Verhalten ist Quarzglas, dessen maximale Dehnung im Temperaturbereich +20....-170°C etwa -0,025 % beträgt und zu tieferen Temperaturen hin sogar wieder gegen Null geht (s. Abb. 20). Gegenüber den zu messenden Dehnungswerten von Beton und Stahl, die im Bereich 1...3 % liegen, kann sogar meist auf eine Korrektur dieses kleinen Fehlers verzichtet werden.

Der Wegaufnehmer selber, auf dessen Temperaturfehler der Anwender keinen Einfluß hat, sollte sich außerhalb der Kälte-
kammer auf konstanter Umgebungstemperatur befinden.

Ausgehend von diesen Überlegungen wurde eine zum Einbau in die in 3.3.1 beschriebene Kältekammer geeignete Dehnungsmeß-
vorrichtung aus Quarzglas entwickelt und von einem auf

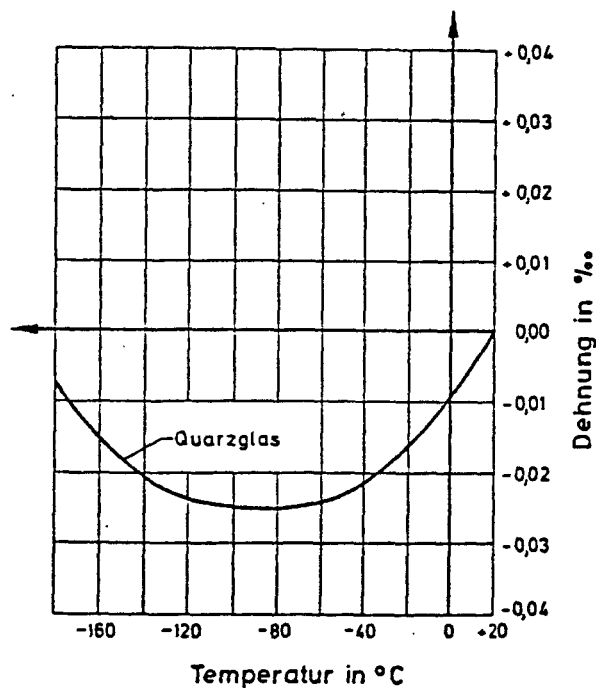


Abb. 20:

Temperatur-Dehnungs-
Verhalten von Quarzglas

Quarzglasverarbeitung spezialisierten Betrieb angefertigt. Eine Rahmenkonstruktion in Form eines gleichseitigen Dreiecks mit einer dazwischen eingesetzten Platte bildet die Grundplattform. Jeweils drei im Winkel von 120° versetzt angeordnete Aufstandspunkte für Würfelproben mit 150 mm Kantenlänge sowie Zylinderproben mit 80 mm \varnothing gewährleisten einen sicheren Stand der Probekörper. Deren unterschiedliche Höhe wird durch einen entsprechenden Höhenversatz der auf Kreisen mit 30 mm bzw. 53 mm Radius liegenden Aufstandspunkte kompensiert (s. Abb. 21).

Ein mittig an der Unterseite der Grundplatte angebrachter Standbolzen bewirkt, daß das Dilatometer nur an einem Punkt auf dem Kammerboden aufliegt, so daß mit unerwünschten Erschütterungen verbundene Rutscherscheinungen durch ungleiche Dehnung der verschiedenen Materialien ausgeschlossen sind. Drei auf einem Radius von 25 mm um den Mittelpunkt der Grundplatte liegende Bohrungen ermöglichen die freistehende Montage eines Stahlabschnittes von 160...170 mm Länge mittels einer an seinem unteren Ende angeklebten Halterung.

An den drei Ecken des Grundrahmens sind senkrecht nach oben gehende Quarzvollstäbe mit 12 mm \varnothing angeschweißt, die in ca.

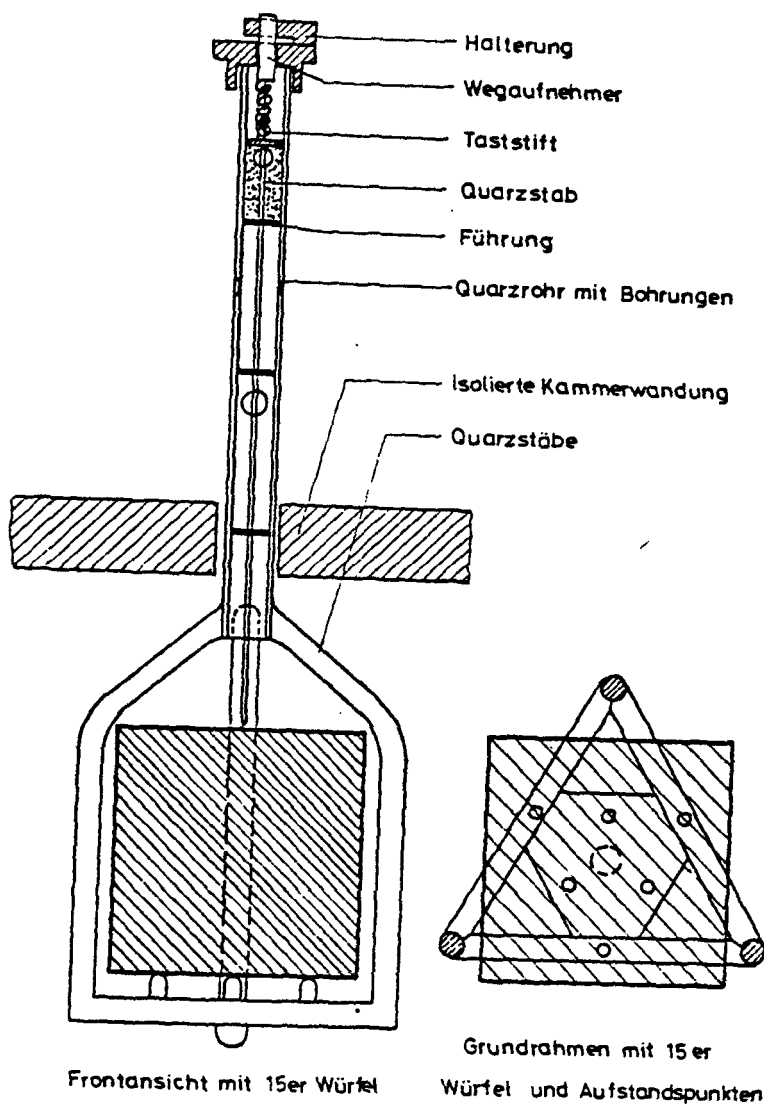


Abb. 21:

Dehnungsmeßvorrichtung
aus Quarzglas

150 mm Höhe nach innen abgeknickt und mit dem unteren Ende eines dickwandigen Quarzglasrohres mit 30 mm Außendurchmesser verschmolzen sind. Dieses Rohr ragt durch eine Bohrung oben aus der Kältekammer heraus und trägt an seinem Ende eine Halterung für einen induktiven Wegtaster. Dessen Taststift drückt auf einen konzentrisch innerhalb des Rohres verlaufenden Quarzstab, dessen unteres, zu einer Spitze geformtes Ende auf der oberen Stirnfläche der jeweiligen Probe aufliegt und so deren Dehnung auf den Wegtaster überträgt. Einige im außerhalb der Kammer liegenden Teil des Rohres auf unterschiedlicher Höhe angebrachte Bohrungen und dazwischen liegende Blenden verhindern, daß kaltes N_2 -Gas im Rohr bis zu dem Wegaufnehmer hochsteigen und diesen unzulässig stark abkühlen kann. Dem

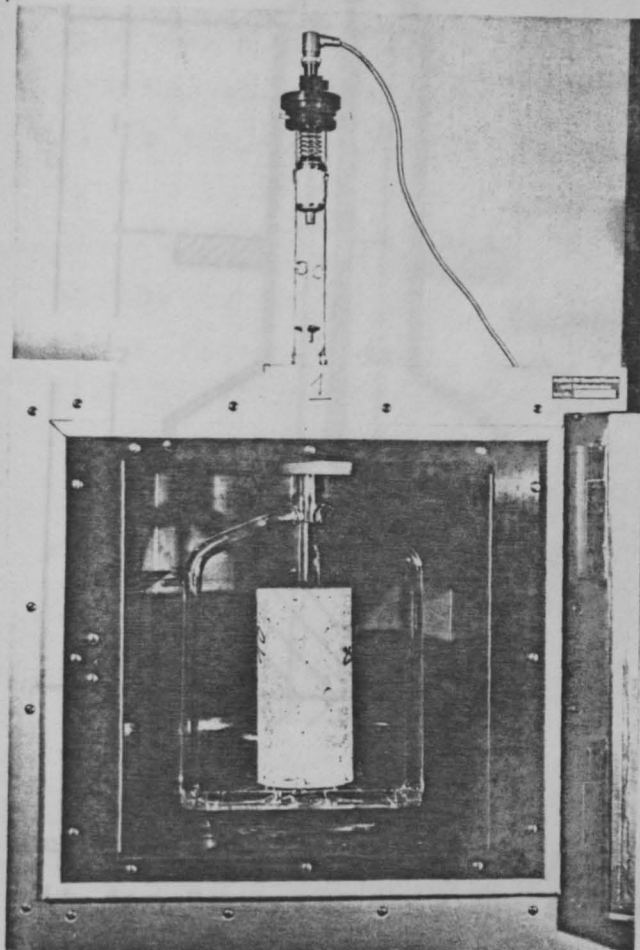


Abb. 22: Dilatometer mit eingesetzter Betonprobe

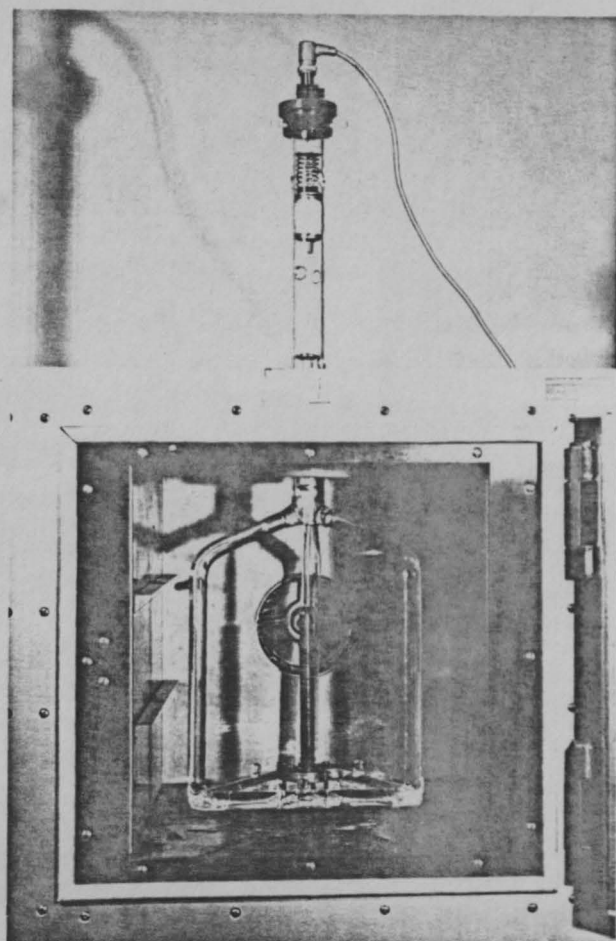


Abb. 23: Dilatometer mit eingesetzter Stahlprobe

gleichen Zweck dient eine lockere Wattefüllung direkt unterhalb des Aufnehmers; zusätzlich kann dieser von außen durch eine Styroporschale isoliert werden

Betrachtet man die Grundplatte des Dilatometers als völlig starr, so ergibt sich die gemessene Dehnung ϵ_M als Differenz der Änderungen der Längen l und l' :

Ist:

$$\epsilon_M = \Delta l' - \Delta l \quad ,$$

wobei l die Summe der Längen der senkrechten Quarzglasstreben sowie des Quarzglasrohres darstellt und l' die Höhe des Probekörpers plus die Länge des als Taststiftverlängerung fungierenden Quarzglasstabes.

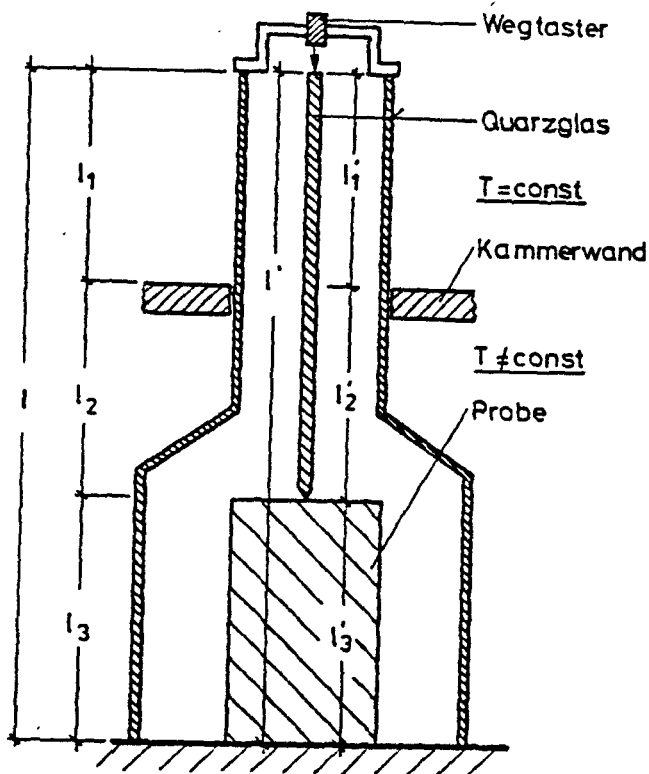


Abb. 24:
Prinzipskizze des
Dilatometers

Durch die Unterteilung in zwei getrennte Temperaturbereiche mit der Kammerwand als Trennstelle folgt für die gemessene Dehnung:

$$\epsilon_M = (\Delta l_1' + \Delta l_2' + \Delta l_3') - (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3) \quad .$$

Die Dehnungen Δl_1 und $\Delta l_1'$ sind in erster Näherung wegen der konstanten Temperatur gleich Null. Die Strecken l_2 und l_2' bestehen aus identischem Material und sind dem gleichen Temperaturprofil unterworfen, die auftretenden Dehnungen Δl_2 und $\Delta l_2'$ sind daher gleich groß und heben sich gegenseitig auf. Übrig bleibt, da $\Delta l_3'$ die Gesamtdehnung ϵ_{pr} der Probe und Δl_3 die Dehnung ϵ_{Qu} eines gleich langen Quarzglasstabes ist:

$$\epsilon_M = \epsilon_{pr} - \epsilon_{Qu} \quad .$$

Die Größe ϵ_{Qu} bewirkt also einen Fehler, um den bei sehr hohen Genauigkeitsansprüchen korrigiert werden muß. Verglichen mit den Dehnungswerten von trockenem Beton beträgt ϵ_{Qu} allerdings maximal 2...3 % von ϵ_{pr} , so daß wegen der Inhomogenität des Betons und der dadurch verursachten relativ großen Streubreite

der absoluten Meßwerte eine Korrekturrechnung nicht sinnvoll erscheint. Die Genauigkeit beim relativen Vergleich mehrerer ϵ -T-Kurven bleibt ohnehin erhalten, da der Fehler ϵ_{Qu} in allen Messungen gleichermaßen enthalten ist.

Die gemessene Dehnung stellt wegen des bei kontinuierlicher Abkühlung unvermeidlichen Temperaturgradienten im Probekörper stets einen Mittelwert von Dehnungen einzelner Volumenelemente mit unterschiedlichen Temperaturen dar. Um wirklich exakte ϵ -T-Diagramme zu erhalten, müßte auch die zugeordnete Temperatur als integraler Mittelwert sämtlicher beteiligten Proben-segmente vorliegen, was wegen der punktförmigen Charakteristik der Thermoelemente nur mit einer Vielzahl von Meßstellen zu erreichen wäre.

Bei Verwendung eines einzelnen Thermoelementes, zumal wenn dieses auf der Probenoberfläche angebracht ist, tritt eine leichte Verschiebung der Temperaturachse auf, deren Richtung sich beim Übergang von der Kühl- zur Aufwärmphase umkehrt, da der gemessene Temperaturwert erst unter-, dann oberhalb des der gemessenen Dehnung zuzuordnenden Temperatur-Mittelwertes liegt. Zwar ist dieser Kurvenversatz bei den o.g. Abkühl- und Aufwärmgeschwindigkeiten relativ klein; er läßt sich jedoch noch weiter reduzieren, indem das Thermoelement in geeigneter, experimentell zu bestimmender Tiefe unter der Probenoberfläche angebracht wird, wo die Temperatur in etwa dem angestrebten Mittelwert entspricht.

In Abb. 25 sind einige Temperatur-Dehnungslinien für Spannstahl sowie für Betonproben unterschiedlichen Feuchtegehalts dargestellt. Der Übersichtlichkeit halber sind die in der Aufwärmphase ermittelten Kurvenäste nur für die Proben mit 90, 97 und 100 % relativem Feuchtegehalt und nur oberhalb von -50°C eingezeichnet. Der maßgebliche Einfluß des in den Betonporen enthaltenen Wassers auf das Temperaturdehnverhalten ist deutlich zu erkennen; der Kontraktion des Betons überlagert sich im Bereich zwischen 0°C und -60°C die Ausdehnung des Eises, da der Gefrierpunkt unter dem Einfluß von Druck und Oberflächen-

effekten in den Poren sowie durch gelöste Salze zu tieferen Temperaturen verschoben wird.

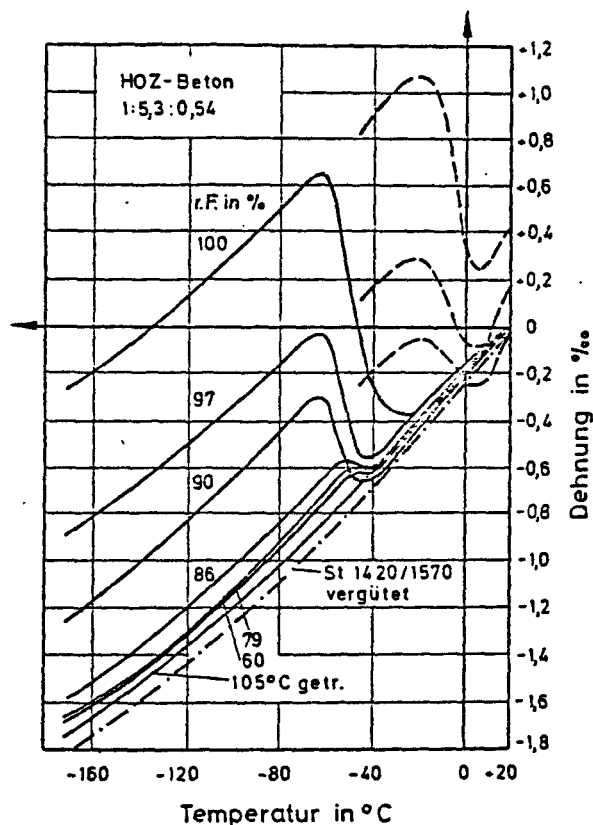


Abb. 25:

Temperatur-Dehnungs-Diagramm von Spannstahl und HOZ-Beton unterschiedlicher Feuchte

4. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens "Entwicklung von Prüftechnologien für die Ermittlung des Festigkeits-, Verformungs- und Temperaturdehnverhaltens von Betonstahl, Spannstahl und Beton im Bereich tiefer Temperaturen" wurden am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig mehrere Prüfapparaturen für die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit der wichtigsten mechanischen Eigenschaften von Stahl und Beton im Bereich $+20^{\circ}\text{C}$ bis -196°C entwickelt, aufgebaut und im praktischen Einsatz erprobt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf möglichst weitgehender Vergleichbarkeit der Meßergebnisse zu den mit herkömmlichen Prüfmethoden bei Raumtemperatur ermittelten Werten.

Für die Zugprüfung von Spanndrähten und -litzen sowie Betonstählen wurde eine mit flüssigem Stickstoff (LN_2) betriebene, in eine Universalprüfmaschine integrierbare Kältekammer entwickelt, in der Proben von 1 m Länge mit einer Last von maximal 1000 kN beaufschlagt werden können. Eine Dreiteilung der Kammer ermöglicht die getrennte Kühlung von Einspann- und Prüfbereich der Proben, wobei die Temperaturen über ein elektronisches Regelsystem angefahren und konstantgehalten werden. Die Verformungsmessung mit speziellen tieftemperaturgeeigneten induktiven Wegaufnehmern gestattet die direkte Aufzeichnung von Last-Verformungs-Diagrammen.

Die Untersuchung der Druck- und Spaltzugfestigkeit von Beton erfolgt in einer modifizierten, handelsüblichen LN_2 -Kältekammer, die in eine Universalprüfmaschine eingesetzt wird, wobei vorzugsweise zylindrische Probekörper mit den Dimensionen 160 mm x 80 mm \varnothing verwendet werden. Die Last wird über in die Kammer hineinreichende Druckstempel aufgebracht und die Verformung der Proben bei elektronisch konstant gehaltener Temperatur mit aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen ermittelt.

Zur Messung der temperaturabhängigen Verformung von Stahl und Beton wurde ebenfalls eine industriell gefertigte, LN_2 -betriebene Kältekammer so modifiziert, daß durch ein aus Quarzglas hergestelltes Dilatometer die Dehnung des Probekörpers im Innenraum auf einen induktiven Wegaufnehmer außerhalb der Kammer übertragen werden kann. Die dabei auftretenden Fehler durch thermische Eigendehnung des Meßsystems sind i.A. zu vernachlässigen. Es können Probekörper bis zu einer Grundfläche von 150 x 150 mm und einer Höhe von ca. 180 mm eingesetzt werden. Ein programmierbarer Regler steuert selbsttätig definierte, kontinuierliche Temperaturänderungen und ermöglicht so die direkte Aufzeichnung von Temperatur-Verformungs-Diagrammen.

Mit den hier beschriebenen Prüfvorrichtungen können die wichtigsten für die Erstellung von Speicherbauwerken aus Spannbeton für flüssiges Erdgas relevanten Materialkennwerte der Baustoffe

Stahl und Beton im gesamten in Frage kommenden Temperaturbereich ermittelt werden. Der apparative Aufwand bleibt durch die Mitbenutzung vorhandener Prüfmaschinen und Meßgeräte sowie die Verwendung eines einheitlichen, bewährten Verfahrens zur Kälteerzeugung in vertretbarem Rahmen, so daß die hier entwickelten Prüftechnologien grundsätzlich von jeder mit der Baustoffprüfung befaßten Institution übernommen bzw. nachgebaut und angewandt werden können.

5. Literatur

- [1] Kordina, K., Neisecke, J.: Die Ermittlung der Gebrauchseigenschaften von Beton und Spannstahl bei extrem tiefen Temperaturen. Beton u. Fertigteil-Technik, H. 4 (1978)
- [2] Rostásy, F.S., Schneider, U., Wiedemann, G.: Behaviour of mortar and concrete at extremely low temperatures. Cement and Concrete Research, Vol.9, No. 3, pp 365-376 (1979)
- [3] Rostásy, F.S., Schneider, U., Wiedemann, G.: Ein Beitrag zum Tieftemperaturverhalten von Zementmörtel und Beton. In: Forschungsbeiträge für die Baupraxis. (Kordina-Festschrift) Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, S. 115-131 (1979)
- [4] Rostásy, F.S., Wiedemann, G.: Festigkeit und Verformung von Beton bei sehr tiefer Temperatur. beton 30, H. 2, S. 54-59 (1980)
- [5] Rostásy, F.S., Weiss, R., Wiedemann, G.: Changes of pore structure of cement mortars due to temperature. Cement and Concrete Research, Vol.10, No. 2, pp 157-164 (1980)
- [6] Rostásy, F.S., Wiedemann, G.: Stress-strain-behaviour of concrete at extremely low temperature. Cement and Concrete Research, Vol.10, No. 4, pp 565-572 (1980)
- [7] Kyowa Electronic instruments Co., LTD. Engineering News, No. 4 / 224
- [8] Hartig, G., Wüchner, F.: Tieftemperatureigenschaften von Dehnungsmeßstreifen. Materialprüfung 18, Nr. 2, S. 40-44 (1976)
- [9] Felgner, K., Hoffmann, K.: Das Verhalten von induktiven Wegaufnehmern und von Dehnungsmeßstreifen bei tiefen Temperaturen (-196°C). Sonderdruck der Firma Hottinger Baldwin Meßtechnik